

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Estudi de la capa límit de diferents rugositats

MEMÒRIA

Autor: Andrés Benito Moreno
Director: Enric Trillas Gay
Convocatòria: Juliol 2019



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

Aquest treball de fi de grau té la intenció de establir quina seria la millor superfície per un banyador de competició. Per tal d'aconseguir-ho es té l'objectiu de estudiar superfícies amb diferents rugositats uniformement distribuïdes, observant el comportament de les seves capes límit. Finalment, determinar quina obté uns majors avantatges en front les altres, i per tant quina seria millor implementar en el banyador.

El desenvolupament d'aquest projecte es donarà en tres etapes. La primera, una explicació teòrica sobre la capa límit, on s'exposaran les bases necessàries per poder entendre i portar a terme tot el projecte. La següent, simulació numèrica, on es faran unes simulacions per estudiar les diferents superfícies. Finalment, s'observaran els resultats obtinguts i es compararan adientment. En funció d'això, es determinarà quina es la millor superfície per al banyador.

Sumari

SUMARI	4
1. PREFACI	7
1.1. Origen del projecte.....	7
1.2. Motivació.....	8
2. INTRODUCCIÓ	9
2.1. Objectius del projecte	9
2.2. Abast del projecte	9
3. FONAMENTS TEÒRICS	10
3.1. Concepte de capa límit	10
3.2. Capa Límit Laminar en una placa plana	11
3.2.1. Estimació del gruix de la capa límit laminar.	11
3.2.2. Gruix de desplaçament de la capa límit laminar.....	12
3.2.3. Gruix de la quantitat de moviment de la capa límit.....	13
3.2.4. Estimació de les forces de fricció de la capa límit laminar.....	14
3.3. Transició de la Capa Límit Laminar a Turbulenta.	15
3.4. Capa Límit Turbulenta en una placa plana.	16
3.4.1. Estimació del gruix de la capa límit turbulenta.	16
3.4.2. Gruix de desplaçament de la capa límit turbulenta.	16
3.4.3. Estimació de les forces de fricció de la capa límit laminar.....	17
3.5. Capa Límit en un perfil d'ala.	17
3.6. Separació de la capa límit.....	19
3.6.1. Condició de separació.....	21
3.6.2. Diferències de la separació de capa límits laminar i turbulenta.....	23
3.7. Riblets.	25
4. PLANTEJAMENT TEÒRIC DEL PROBLEMA.	27
5. SIMULACIONS.	32
5.1. Preparació Simulacions (Solidworks).	32
5.2. Simulacions en ANSYS.	35
6. RESULTATS.	45
7. ANÀLISI ECONÒMIC.	56
7.1. Planificació Temporal del Projecte.....	56
7.2. Discretització de les eines utilitzades.....	58

7.3. Costos totals.....	59
8. IMPACTE MEDIAMBIENTAL.	61
CONCLUSIONS	63
BIBLIOGRAFIA	66
Referències bibliogràfiques.....	66
Bibliografia complementària.....	67

1. Prefaci

1.1. Origen del projecte

Des de temps immemorials, l'avanç de la ciència a impulsat el progrés de la humanitat. Gràcies a ampliar els nostres coneixements, hem pogut crear tecnologia i millorar-la al llarg de la història. Això, ens ha permès gaudir d'una qualitat de vida superior amb el pas dels anys.

Però aquests canvis no només han tingut incidència en els aspectes bàsics i essencials de la vida, sinó que han canviat per complet el nostre dia a dia.

Com per exemple en l'esport. Els últims darrers d'anys, la ciència i les noves tecnologies han influït directament en l'evolució dels esports: facilitat de consum (de poder practicar-los, i poder veure'ls com entreteniment), millora de la qualitat (proporcionant ajuda als esportistes professionals i a les federacions oficials d'esports) i superant els límits a nivell competitiu.

En aquest últim aspecte, l'avanç tecnològic afecta més directament a uns esports que a uns altres. En alguns, aquest ajut és tan clar, que és difícil saber si el mèrit de guanyar i marcar nous rècords és de la persona o de l'ajut tecnològic.

És el cas concret de la natació, on s'han desenvolupat banyadors de competició que han permès una millora en els temps de competició impressionant. En 2008, una prestigiosa marca internacional de natació, va treure a la llum un nou model, just l'any de les olimpíades. En Pequín, es van trencar 25 marques mundials, i moltes més olímpiques. En el mundial de 2009 de Roma, es va continuar amb aquesta dinàmica i finalment la FINA va prohibir la utilització d'aquests banyadors en 2010.

Una decisió que preserva la competitivitat i la importància del nedador en l'esport, però que també prova l'eficàcia del banyador. En aquest treball desenvoluparem aquesta idea, com diferents superfícies de teixit poden millorar les condicions aerodinàmiques del nedador.

1.2. Motivació

Sempre he sigut un aficionat als esports, i sempre m'ha agradat practicar-ne de tota mena. La natació, en concret, sempre ha estat el que més m'ha agradat per practicar-ho de forma individual.

Després de cursar mecànica de fluids, vaig trobar-li nous interessos a l'esport. Això va ser degut a poder comprendre el comportament del flux i la capa límit en diferents situacions bàsiques, i poder-les relacionar amb l'aigua i el nedador. Conseqüentment poder teoritzar sobre les diferents tècniques de natació i un millor moviment dins de l'aigua.

Quan vaig tenir la oportunitat de fer aquesta proposta de treball de final de grau, no ho vaig dubtar, ja que és gratificant poder intentar entendre perquè diferents tipus de superfícies i teixits beneficien més o menys al nedador.

2. Introducció

2.1. Objectius del projecte

L'objectiu del projecte es poder determinar com afecten diferents rugositats d'una superfície en la seva capa límit, i per tant deduir quin tipus de superfície beneficiaria més a un nedador de competició.

2.2. Abast del projecte

Per poder aconseguir-los plantejarem unes condicions de flux (velocitat, viscositat...) i de rugositat que s'assemblin lo màxim possible a les dels nedadors professionals.

Prèviament, haurem explicar els fonaments teòrics de la capa límit i la seva importància dins d'aquest treball. Després fer un plantejament teòric abans de la simulació, per tal de determinar quines superfícies utilitzarem en concret.

Finalment, per tal d'obtenir unes conclusions coherents, farem unes simulacions numèriques amb l'ANSYS FLUENT (introduint les condicions ja esmentades), fent estudis 2D i 3D en les diferents superfícies amb rugositats.

3. Fonaments Teòrics

3.1. Concepte de capa límit

En la majoria d'aplicacions tecnològiques amb fluids, els fluxos presenten unes característiques concretes: unes baixes viscositats, i per tant, uns números de Reynolds molt alts. En aquests casos, es una bona aproximació presentar $Re=\infty$ com a cas límit.. Un inconvenient d'aquesta aproximació és que la condició antilliscant no es compleix, és a dir, les velocitats a la paret no són zero, però són finites. Hem de tenir en compte la viscositat per tal de satisfer la condició antilliscant. Aquesta consideració ens ajuda a fer la transició de la velocitat del valor finit del cas límit proper a la paret fins al valor de zero directament a la paret.

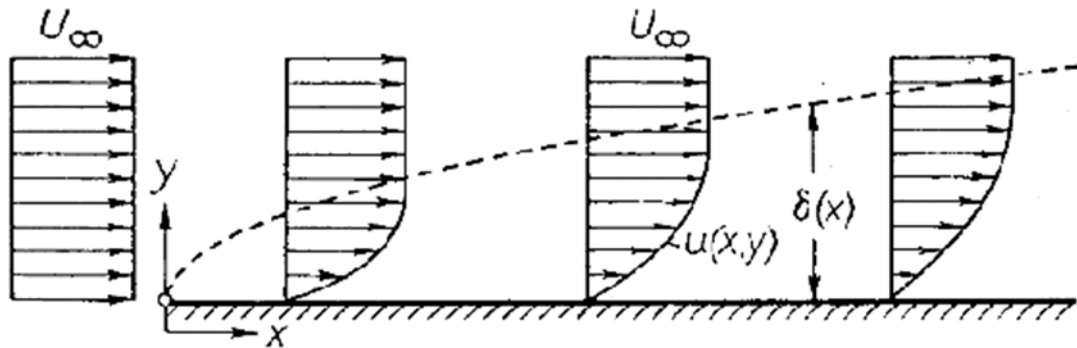
En 1904 L. Prandtl va anomenar capa límit o capa de fricció a la capa prima propera a la paret on té lloc la transició anomenada anteriorment, sempre que els números de Reynolds siguin molt alts. Com es veurà més endavant, la capa límit és més prima com més gran sigui el nombre de Reynolds, i per tant, com més petita sigui la viscositat.

El concepte de capa límit implica que els fluxos amb un nombre elevat de Reynolds es poden dividir en dues regions amb grans diferències dimensionals. La primera es la més gran i representa quasi tota la porció de l'espai. En el gruix d'aquesta regió, la viscositat es pot descuidar i per això s'anomena flux extern sense fricció. La segona regió és la capa límit, una capa molt fina de la paret on cal tenir en compte la viscositat.

Dins de la capa límit es poden produir les dues formes de flux: laminar o turbulent. Llavors es parla de la capa límit laminar i la capa límit turbulenta

La divisió del camp del flux entre el flux extern sense fricció i la capa límit, condueix a considerables simplificacions i facilitats en el tractament teòric dels fluxos de nombre Reynolds elevats.

3.2. Capa Límit Laminar en una placa plana



Il·lustració 1. Capa límit en una placa plana amb incidència zero [1].

La distribució de la velocitat de la capa límit en una placa plana es mostra de manera esquemàtica en la *Il·lus. 1*. La distribució de velocitats abans de xocar amb la placa és constant i perpendicular a aquesta. A mesura que aquesta distribució avança sobre la placa, la quantitat de partícules que s'alenteixen degut a la fricció amb la placa plana creix. Per això cada vegada la distribució de velocitats és menys uniforme.

La funció $\delta(x)$ fa referència al gruix de la capa límit, i com es pot veure és una funció que creix monòtonament. Però, s'ha de mencionar que aquest concepte és artificial. La transició del flux de capa límit a flux extern, en el cas laminar, succeeix de manera continua, sense poder establir un límit precís. Malgrat això, el concepte de gruix de la capa límit és tan útil, que el seu ús és molt comú a la pràctica. El límit que s'estableix llavors arbitràriament, és el punt on la velocitat arriba al 99% de la velocitat del flux exterior, δ_{99} .

3.2.1. Estimació del gruix de la capa límit laminar.

Per a les capes límit laminars en una placa plana, es pot estimar el gruix de la següent manera: a la capa límit les forces de inèrcia i les forces de fricció estan en equilibri. La força inercial per unitat de volum és igual a $\rho u \cdot \frac{\partial u}{\partial x}$. Per a una placa de longitud x , $\frac{\partial u}{\partial x}$ és proporcional a $\frac{U_\infty}{x}$, on U_∞ és la velocitat del flux exterior. Així, la força inercial és de l'ordre de magnitud $\rho \cdot \frac{U_\infty^2}{x}$. D'altra banda, la força de fricció per unitat de volum és de tipus $\frac{\partial \tau}{\partial y}$, i

en fluxos laminars això és igual a $\mu \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$. El gradient de velocitat perpendicular a la paret $\frac{\partial u}{\partial y}$ és de l'ordre $\frac{U_\infty}{\delta}$, de manera que per a la força de fricció per unitat de volum $\frac{\partial \tau}{\partial y} \sim \mu \frac{U_\infty}{\delta^2}$. Igualant les forces de fricció i les inercials obtenim

$$\mu \frac{U_\infty}{\delta^2} \sim \rho \frac{U_\infty^2}{x} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

i resolent per el gruix de la capa límit δ :

$$\delta \sim \sqrt{\frac{\mu x}{\rho U_\infty}} = \sqrt{\frac{\nu x}{U_\infty}} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

A partir de la solució de H. Blasius (1908), trobem el valor desconegut per l'anterior equació, per la capa límit laminar d'una placa plana trobem que:

$$\delta_{99}(x) = 5 \sqrt{\frac{\nu x}{U_\infty}} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Sabent que $Re(x) = \frac{U_\infty \cdot x}{\nu}$, i relacionant el gruix de la capa límit amb la longitud de la placa x , tenim que $\delta(x)$ és:

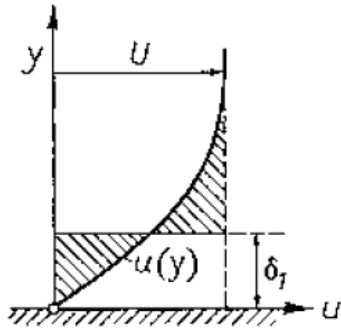
$$\frac{\delta}{x} = \frac{5}{Re_x^{1/2}} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

Aquesta equació final és la que utilitzarem més endavant en el plantejament teòric del problema.

3.2.2. Gruix de desplaçament de la capa límit laminar.

Com ja s'ha mencionat abans, el gruix de la capa límit s'ha definit de manera arbitrària. Una mesura correcta que es podria interpretar mecànicament per al gruix de la capa límit és el gruix de desplaçament δ^* i ve definit per:

$$U\delta^*(x) = \int_{y=0}^{\infty} (U - u) dy \quad (\text{Eq. 4.5})$$



Il·lustració 2. Gruix de desplaçament de la capa límit [1].

U és la velocitat a la vora exterior de la capa límit a la posició x . A partir d'aquest punt, les dues zones ombrades de la *Il·lus. 2* han de ser iguals. El gruix de desplaçament ens indica fins a quin punt les línies de corrent del flux exterior es desplacen per la capa límit. Per a una placa plana, obtenim:

$$\frac{\delta^*}{x} = \frac{1.721}{Re_x^{1/2}} \quad (\text{Eq. 4.6})$$

En altres paraules el gruix de desplaçament es més o menys 1/3 del gruix de la capa límit.

3.2.3. Gruix de la quantitat de moviment de la capa límit.

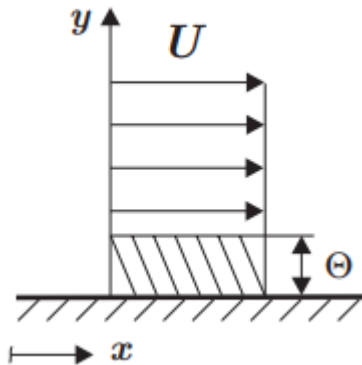
El gruix de la quantitat de moviment de la capa límit θ , es correspon amb el gruix d'una corrent fluida que tingui la mateixa velocitat U_∞ que el flux exterior, i la mateixa variació de la quantitat de moviment que la força d'arrossegament de la capa límit real. Per tant la seva definició matemàtica s'expressa com:

$$\rho U^2 \theta(x) = \rho \int_{y=0}^{\infty} u(U - u) dy \quad (\text{Eq. 4.7})$$

I desenvolupant aquesta expressió obtenim:

$$\theta(x) = \int_{y=0}^{\infty} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad (\text{Eq. 4.8})$$

Esquemàticament, el gruix de la quantitat de desplaçament equivaldria a



Il·lustració 3. Gruix de la quantitat de desplaçament de la capa límit [14].

3.2.4. Estimació de les forces de fricció de la capa límit laminar.

Igual que amb el gruix de la capa límit, la tensió de cisallament a la paret τ_w , i per tant també la fricció d'arrossegament sencera de la placa, es poden estimar. Segons la llei de fricció de Newton, tenim:

$$\tau_w(x) = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_w \quad (\text{Eq. 4.9})$$

On l'índex w indica el valor a la paret. Sabent que $\frac{\partial u}{\partial y} \sim \frac{U_\infty}{\delta}$ trobem que $\tau_w \sim \mu \frac{U_\infty}{\delta}$, i substituint el valor de δ de l'Eq. (4.2),

$$\tau_w(x) \sim \mu U_\infty \sqrt{\frac{\rho U_\infty}{\mu x}} = \sqrt{\frac{\mu \rho U_\infty^3}{x}} \quad (\text{Eq. 4.10})$$

Per tant, la tensió de cisallament de la paret és proporcional a $U_\infty^{3/2}$, i sobretot destaca a $1/\sqrt{x}$. Llavors la tensió de cisallament de la paret d'una placa no és una constant, sinó una funció que disminueix monòtonament amb x . Les tensions de cisallament són particularment grans a prop de la vora davantera de la placa. Segons $\tau_w \sim \frac{\mu U_\infty}{\delta}$, es dedueix que la tensió

de cisallament de la paret és inversament proporcional al gruix de la capa límit, és a dir, com més prima és la capa límit, més gran és la tensió de cisallament de la paret. Per tant, el coeficient de fricció és:

$$C_f = \frac{2\tau_w}{\rho U_\infty^2} = \frac{0.664}{Re_x^{1/2}} \quad (\text{Eq. 4.11})$$

Sabent la relació entre la tensió de cisallament a la paret i la posició $\tau_w(x)$, podem integrar per tal d'obtenir la força de fricció d'arrossegament total. Una placa plana, mullada només per una superfície, amb una amplada b i longitud l té una força de fricció d'arrossegament de:

$$F_D = b \int_0^l \tau_w(x) dx \quad (\text{Eq. 4.12})$$

Utilitzant Eq. (4.9), el coeficient d'arrossegament de la superfície mullada $S = b \cdot l$ és el següent:

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho U_\infty^2 \cdot b \cdot l} = \frac{1.328}{Re_l^{1/2}} \quad (\text{Eq. 4.13})$$

3.3. Transició de la Capa Límit Laminar a Turbulenta.

La capa límit en una placa plana no sempre és laminar. Després d'una distància concreta $x = x_{crit}$ (des del principi de la placa), la capa límit es torna turbulenta. El número de Reynolds crític format amb la distància fins el punt de transició és:

$$Re_{x_{crit}} = \left(\frac{U \cdot x}{\nu} \right)_{crit} = 5 \cdot 10^5 \quad (\text{placa plana}) \quad (\text{Eq. 4.14})$$

La capa límit d'una placa plana és laminar a la part inicial i es torna turbulenta a mesura que la distancia avança, consegüentment la posició del punt de transició x_{crit} es pot determinar

mitjançant el nombre crític de Reynolds $Re_{x\text{ crit}}$ donat.

Encara que la transició de laminar a turbulent és una regió de longitud finita, s'utilitza un punt de transició per a la simplicitat i sovint es suposa que la transició és sobtada. El valor numèric de Re_{crit} depèn fortament de la quantitat de pertorbacions i irregularitats que presenta la superfície. En un flux fortament pertorbat, el Reynolds crític es normalment $3 \cdot 10^5$, mentre que per a fluxos particularment suaus (superfícies molt llises) s'han aconseguit valors de $Re_{crit} = 3 \cdot 10^6$.

3.4. Capa Límit Turbulenta en una placa plana.

Generalment, no hi ha cap teoria exacta sobre la capa límit turbulenta d'una placa plana. Tot i així, hi ha moltes solucions numèriques basades en càlculs empírics per a la viscositat turbulenta. La més utilitzada (la que faré servir en els càlculs posteriors y vam utilitzar a la assignatura de mecànica de fluids), s'obté a partir d'un anàlisi integral, aproximat al que hem fet en el cas de la capa límit laminar.

Per tal de centrar-nos en l'objectiu desitjat, estalviaré l'anàlisi i donaré directament les equacions per a capa límit turbulenta equivalents a las que he mostrat en capa límit laminar.

3.4.1. Estimació del gruix de la capa límit turbulenta.

$$\frac{\delta}{x} = \frac{0.16}{Re_x^{1/7}} \quad (\text{Eq. 4.15})$$

3.4.2. Gruix de desplaçament de la capa límit turbulenta.

$$\frac{\delta^*}{x} = \frac{0.02}{Re_x^{1/7}} \quad o \quad \delta^* = \frac{1}{8} \delta \quad (\text{Eq. 4.16})$$

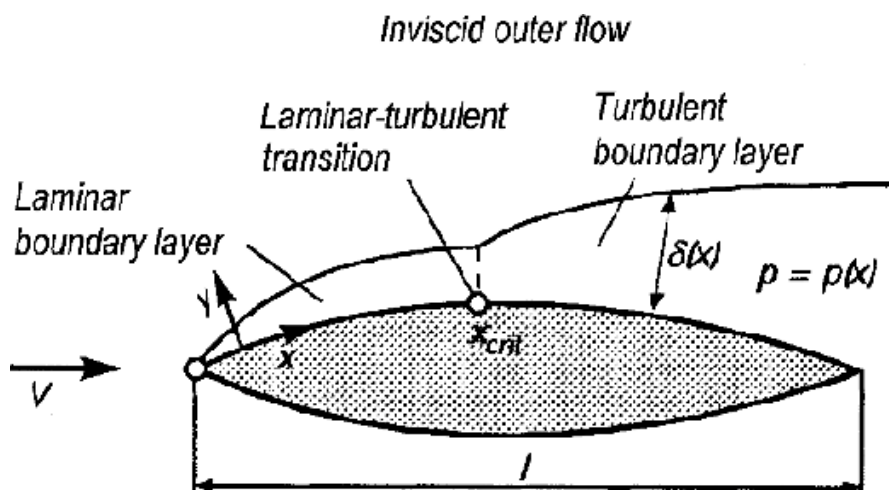
3.4.3. Estimació de les forces de fricció de la capa límit laminar.

$$c_f \approx \frac{0.027}{Re_x^{1/7}} \quad (\text{Eq. 4.17})$$

$$c_D = \frac{0.031}{Re_l^{1/7}} = \frac{7}{6} c_f(l) \quad (\text{Eq. 4.18})$$

3.5. Capa Límit en un perfil d'ala.

Les capes límit en plaques planes son relativament simples, ja que el flux extern era un flux de translació amb pressió constant en tot el camp. Tot i això, en el cas de que el flux passi per sobre un cos amb una forma arbitrària, es crearan forces de pressió addicionals.



Il·lustració 4. Desenvolupament de la capa límit en un perfil d'ala [1].

La *ll·lus. 4* mostra la capa límit en un perfil d'ala, on la dimensió transversal ha sigut allargada per raons de claredat. Igual que succeïa a la placa plana, a l'inici del perfil es desenvolupa una capa límit laminar, i a partir de certa distància sobre el contorn del cos x_{crit} , es dona la transició laminar-turbulenta, i després d'això trobaríem només capa límit turbulenta.

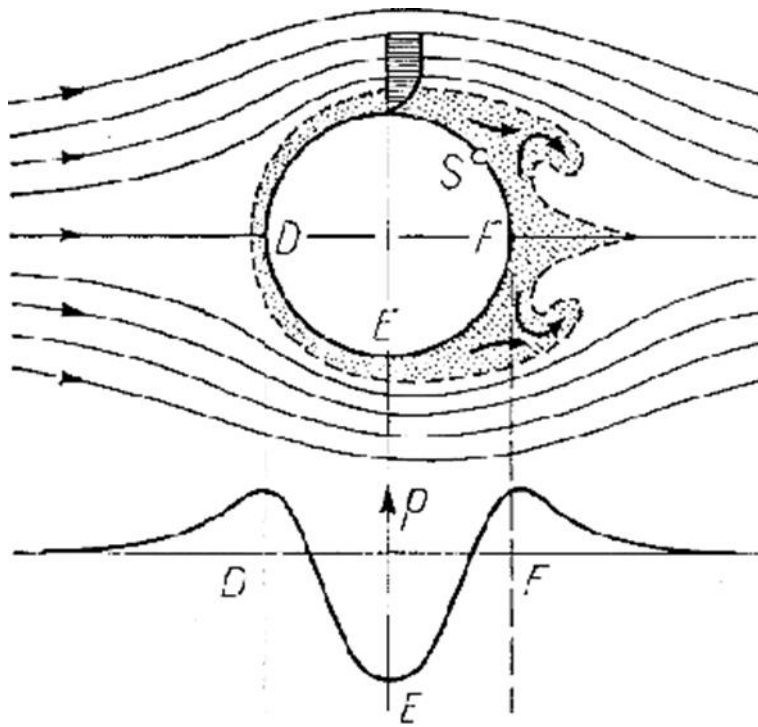
Degut a la geometria del cos, el flux exterior no viscosos origina una distribució de pressions en la vora exterior de la capa límit. Aquesta distribució de pressions s'imposa sobre la capa límit, per exemple, en cada punt x , la pressió en la capa límit perpendicular a la paret és constant. Per tant, la distribució de pressió en la vora exterior de la capa límit és idèntica a la distribució de pressió a la paret. Qualsevol diferència entre aquestes dues distribucions de pressió només podria sorgir de la curvatura de la línia de corrent i el gradient de pressió resultant perpendicular a la direcció del flux principal, com una compensació de les forces centrífugues

Les capes límit, en nombres de Reynolds elevats, son molt estretes en comparació amb el radi de curvatura del contorn del cos, per tant, no es produeixen gradients de pressió perpendiculars a la paret. La pressió es imposada a la capa límit per el flux exterior i només és funció de x . Addicionalment, a mesura que la capa límit es desenvolupa al llarg de la superfície del cos, el gruix de la capa límit $\delta(x)$ creix i la tensió tallant a la paret τ_w decreix. Si la capa límit es turbulenta, el creixement es major que en el cas de que sigui laminar. Quan el nombre de Reynolds augmenta basat en la velocitat del corrent lliure V i la longitud característica del cos l , el gruix de la capa límit disminueix a zero en el cas de límit en $Re \rightarrow \infty$.

La distribució de la pressió imposada per el flux extern és de considerable importància en la formació de la capa límit. Per exemple, la posició de la transició laminar-turbulenta depèn fortament d'ella. Si la pressió creix significativament en la direcció del flux, tal i com pot passar en la part posterior del perfil d'ala o en la part posterior de cossos roms, es possible que la capa límit es separi de la paret. Aquest es un fenomen molt important en l'estudi de la capa límit.

3.6. Separació de la capa límit.

Per poder explicar l'important fenomen de separació de la capa límit, considerarem un flux sobre un cos rom. En aquest cas estudiarem un cilindre com el de la següent Il·lustració.



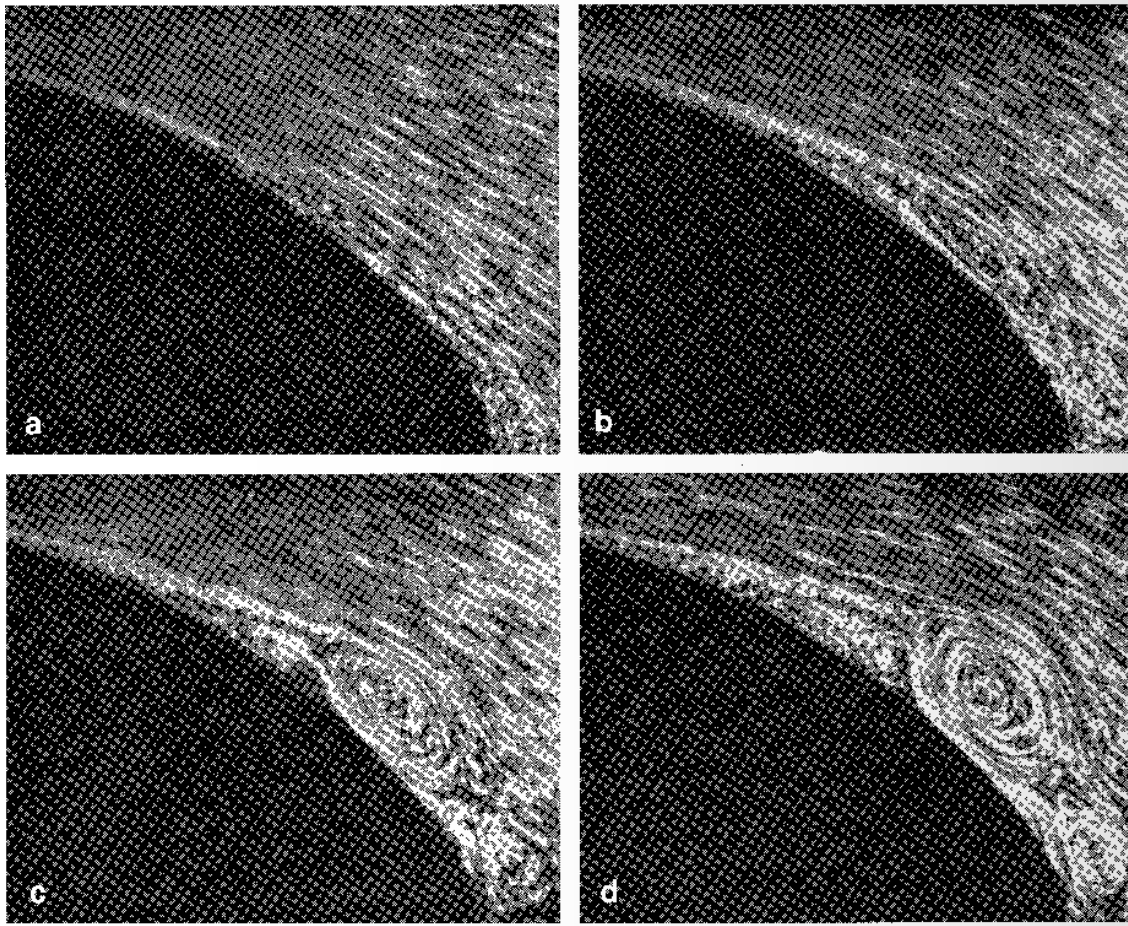
Il·lustració 5. Separació de la capa límit i formació de vòrtex en un cilindre. S = punt de separació [1].

En el flux simètric no viscos, un flux accelerat amb caiguda de pressió està present en la cara frontal, des de D fins a E. Al contrari que en la cara posterior, que hi ha un flux desaccelerat amb increment de pressió, des de E fins a F. Per una partícula en el flux exterior que es mou de D a E, la pressió es transforma en energia cinètica, i de la mateixa forma, per una partícula que es mou de E a F, la energia cinètica es transforma en pressió. Una partícula de fluid directament a la paret en la capa límit té la mateixa distribució de pressions que en el flux exterior, ja que aquesta està imposada en la capa límit com ja vam explicar.

Degut a les fortes forces de fricció en la estreta capa de fricció, una partícula de la capa límit perd gran part de la seva energia cinètica, tanta que no pot superar 'la muntanya de pressió' que hi ha de E a F. Una partícula com aquesta no pot fer molt progrés en la regió de increment de pressió de E a F. Arriba fins un punt mort, i després és empentada cap

enredera per la distribució de pressions del flux exterior.

Aquest procés s'observa molt ve en la següent seqüència de Il·lustracions:

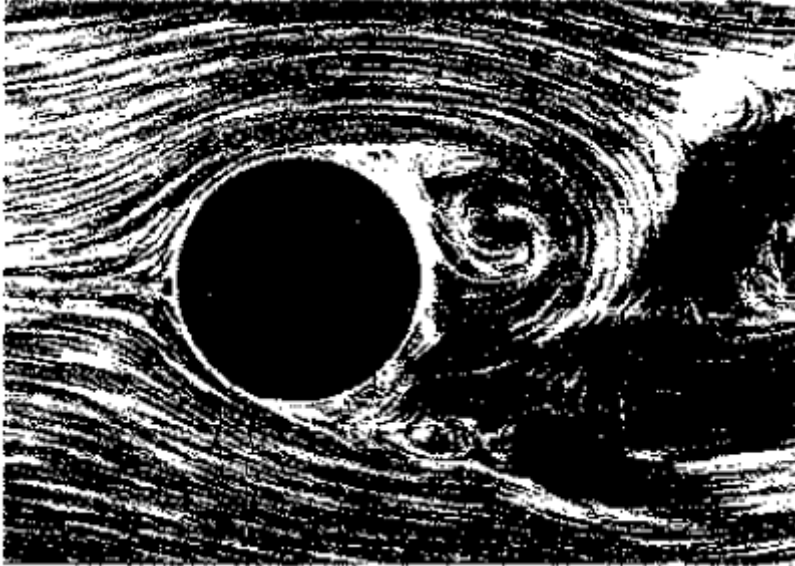


Il·lustració 6. Desenvolupament en el temps de la separació a la part posterior d'un cos rom, de L. Prandtl; O. Tietjens [1].

La pressió creix al llarg del contorn del cos de esquerra a dreta. El flux s'ha fet visible gracies a partícules d'alumini que s'han col·locat sobre la superfície de l'aigua. La capa límit es fàcil de veure en les figures per les curtes línies de corrent de les partícules.

En la *Il·lus. 2.7a* (poc després de començar) el moviment cap enredera just acaba de començar a la vora del final. En la *Il·lus. 2.7b*, la capa límit s'ha fet més estreta, i l'inici de la inversió del moviment s'ha mogut considerablement cap endavant. En la *Il·lus. 2.7c*, es pot veure que s'ha format un gran vòrtex del reflux. En la *Il·lus. 2.7d*, el vòrtex és molt més gran, i aviat es separarà del cos es mourà amb la corrent del flux.

Aquest procés canvia l'aspecte del flux en la part posterior del cos i la distribució de pressions canvia dràsticament en comparació amb la del flux no viscos. L'estat final del flux per al cilindre es pot veure en la següent il·lustració:



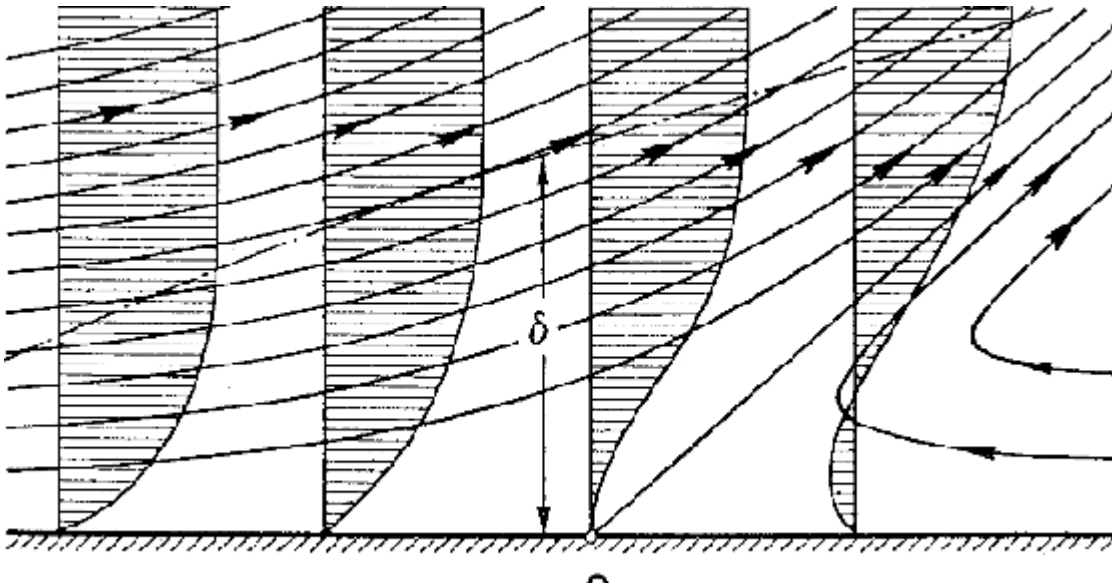
Il·lustració 7. Instantània del flux completament separat darrera d'un cilindre, de L. Prandtl; O. Tietjens [1].

Hi ha una forta pressió negativa en la regió dels vòrtexs. Aquesta pressió negativa es l'origen del gran arrossegament de forma del cos.

3.6.1. Condició de separació.

La teoria de capa límit és capaç, degut al procés de separació, d'explicar l'arrossegament de forma (pressió d'arrossegament). Sempre hi ha perill de separació en regions on la pressió creix, i és inclús més gran quan el creixement és major, particularment en cossos amb costats posteriors roms.

L'aspecte del flux de la capa límit proper a la separació es del tipus que es mostra en la següent il·lustració.



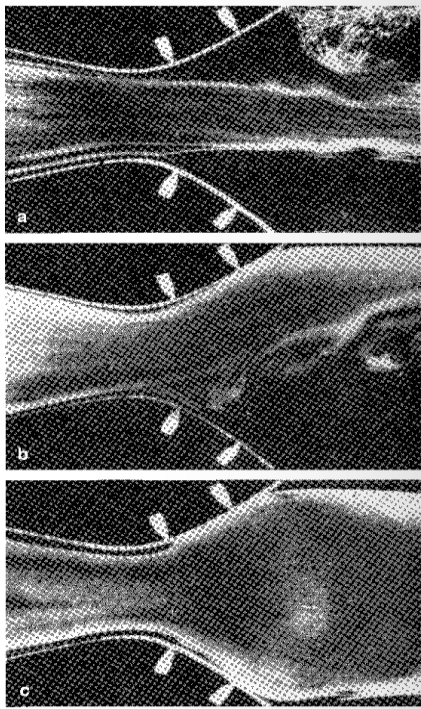
Il·lustració 8. Flux de la capa límit proper al punt de separació S = punt de separació [1].

Com resultat del reflux proper a la paret, apareix un fort engruiximent de la capa límit, i amb això, massa de la capa límit es transportada fora, cap al flux exterior. En el punt de separació, les línies de corrent es separen de la paret en un angle concret. La posició de separació ve donada per la condició de que el gradient de velocitats perpendicular a la paret desapareix en la paret, en altres paraules, la tensió tallant de la paret τ_w desapareix:

$$\tau_w = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) = 0 \quad (\text{separació}) \quad (\text{Eq. 4.25})$$

La posició de separació només es pot determinar per càlculs exactes (integració de les equacions diferencials de la capa límit).

El mateix procés de separació també succeeix en un canal que s'eixampla en la direcció del flux (difusor), tal i com mostra la següent il·lustració:



Il·lustració 9. Flux en un canal d'eixamplament (difusor) (a) separació en ambdues parets del difusor, (b) succió de la capa límit a la paret superior del difusor, (c) succió en ambdues parets del difusor. (de L. Prandtl; O. Tietjens) [1]

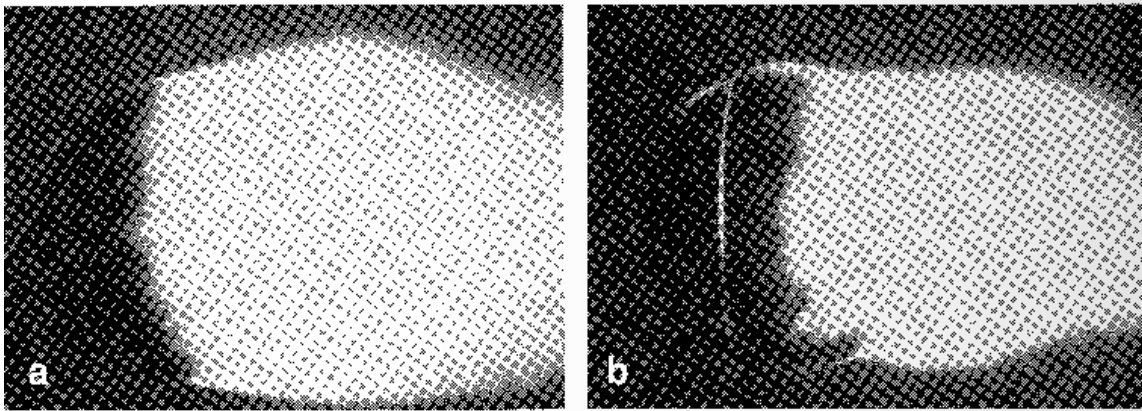
3.6.2. Diferències de la separació de capa límits laminar i turbulenta.

Per a cossos roms en els que es dona la separació, succeeix un fenomen particular. El punt de separació per a fluxos laminars es situa aproximadament en l'equador del cos, mentre que quan la capa límit es torna turbulenta la separació es dona més enredera.

El punt de separació es mou cap enredera degut a que l'acció energitzant del flux exterior a la capa límit turbulenta és molt més gran que en el cas laminar. Conseqüentment el deixant del cas turbulent es bastant més petit que el del cas laminar, i la distribució de pressions s'assembla més a la d'un fluid no viscos. També es molt important que la reducció del deixant comporta una reducció en el coeficient d'arrossegament de forma C_D .

L. Prandtl (1914), va ser capaç de demostrar i explicar el fenomen anterior col·locant un anell de filferro al voltant d'una esfera la posició del' equador. Això, artificialment, fa que el flux laminar sigui turbulent en un nombre de Reynolds més baix, i es produeix la mateixa

caiguda en la força d'arrossegament que normalment només passa en números de Reynolds més alts. La Il·lus 9 mostra aquest fenomen:



Il·lustració 10. Flux sobre una esfera, segons C. Wieselsberger (1914). (a) flux subcrític en un règim de nombre de Reynolds subcrític, (b) flux supercrític en un règim de nombre de Reynolds subcrític. La aplicació d'un filferro fa complir que el flux sigui subcrític. [1]

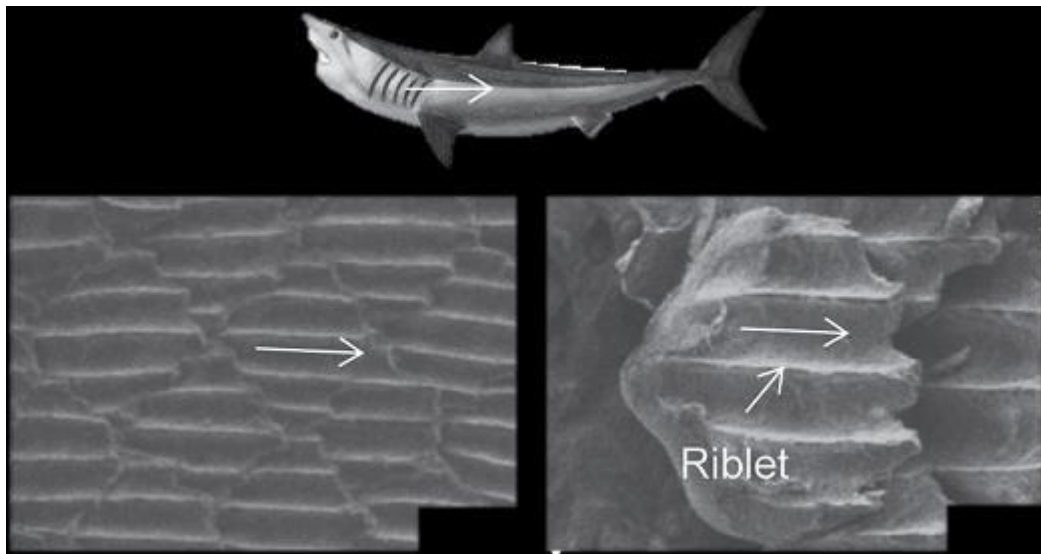
Altres cossos que tenen parts posteriors romes mostren, en principi, una dependència similar entre el coeficient d'arrossegament y el nombre de Reynolds. Para tots els cossos més estrets, el salt en la corba del coeficient d'arrossegament retrocedeix i avança.

Hi ha una altre diferència entre la separació de capa límit laminar y turbulenta. Després de que la capa límit s'hagi separat del cos, es desenvolupa més endavant en lo que es denominen capes de tall lliure, aquestes formen la estela. En el cas límit $Re = \infty$, les capes de tall lliure laminars es redueixen a línies i superfícies de discontinuïtat. En contrast, les línies de tall lliure turbulentes tenen un gruix finit a $Re = \infty$. Si les capes de tall lliure es formen amb separació de capa límit, el cas límit $Re = \infty$ no té viscositat, però sí que té fricció, una fricció aparent, degut a que el moviment fluctuant turbulent existeix.

3.7. Riblets.

Els riblets són micro-solcs a la superfície, alineats amb la direcció de flux lliure. Estudiats en les pells d'animals marins que naden a alta velocitat (taurons, dofins, peixos...), s'observava que els hi aportava beneficis aerodinàmics.

Aquest tipus de superfície ha estat comprovada de ser capaç de reduir la resistència d'avanç i reduir truculències a la paret. Per això, ja ha estat utilitzada en diverses aplicacions d'enginyeria, tant àrees més industrials com altres més relacionades en transports aquàtics o aeris.



Il·lustració 11. Riblets en la pell d'un tauró [2].

Per tal de entendre el perquè i poder utilitzar-ho en les diverses aplicacions ja nombrades, han sigut estudiats extensament (sobre els anys 1990 i 2000), i s'ha pogut comprovar que efectivament redueixen la força de fricció.

Per donar-li explicació a aquest fenomen s'han suggerit diferents mecanismes: debilitament del procés de separació a prop de la paret, retard significatiu del flux en la vall del solc dominat per efectes viscosos, un augment en el gruix de la sub-capa viscosa. I és molt probable que tots aquests mecanismes tinguin un paper important a l'hora de reduir la tensió de tall de la paret.

Segons la publicació científica [13], 'S'ha demostrat que els riblets poden retardar la transició a la turbulència d'una capa límit laminar excitada, sub-capa viscosa, (Starling i Choi, 1997)'.

Continua manifestant que els riblets creen una regió dominada per la viscositat en la base de les valls dels riblets, on la tensió de tall es molt baixa.

En paraules de la mateixa publicació *'la taxa de creixement del gruix del moment durant l'etapa no lineal de la transició sobre la superfície llisa és més gran que sobre la superfície acanalada; addicionalment, la intensitat de la turbulència es redueix amb els riblets, el que dona suport al fet que la transició a la turbulència s'ha retardat (Tullis, 1992).'*

4. Plantejament teòric del problema.

Per poder fer un estudi sobre la capa límit de les superfícies amb diferents rugositats, primer estudiarem la capa límit teòrica d'una placa plana en les mateixes condicions.

Abans de començar els càlculs establirem les condicions i característiques de la placa, que també s'estendran per les plaques amb diferents rugositats. Aquestes condicions estan basades en l'aplicació d'aquest treball, que és aplicar les rugositats controlades a els banyadors de nedadors de competició.

La longitud de totes les plaques serà d' 1m, per tal d'observar tots els canvis i transicions que es puguin donar en aquestes.

Per tal de determinar la velocitat del flux hem de establir la velocitat mitjana a la que pot nedar un esportista professional. Per tal de buscar les dades necessàries, he decidit fixar-me en les situacions de competició on es puguin donar les velocitats més altes. Per això he seleccionat competicions nacionals i internacionals, masculines, d'estil lliure (on es neda a crol, l'estil més ràpid) i de durada curta (50 o 100 m). Amb aquests filtres he trobat les dades següents:

Copa d'Espanya 1 divisió, estil lliure 50m (Final) [3]:

Temps primer classificat: 23.03 segons,	velocitat mitjana 2.17 m/s
---	----------------------------

Temps últim classificat: 25.70 segons,	velocitat mitjana 1.94 m/s
--	----------------------------

Jocs Olímpics Rio de Janeiro, estil lliure 50m (Final) [4]:

Temps primer classificat: 21.40 segons,	velocitat mitjana 2.34 m/s
---	----------------------------

Temps últim classificat: 22.08 segons,	velocitat mitjana 2.26 m/s
--	----------------------------

Jocs Olímpics Rio de Janeiro, estil lliure 100m (Final) [4]:

Temps primer classificat: 47.58 segons,	velocitat mitjana 2.1 m/s
---	---------------------------

Temps últim classificat: 48.41 segons,	velocitat mitjana 2.06 m/s
--	----------------------------

Amb aquestes dades he determinat que la velocitat mitjana a la que podria arribar un nedador professional mitjà en distància és 2m/s. No he fet cap mitjana en concret, hi he seleccionat aquest nombre per facilitar de càlculs i generalització del estudi.

El següent que hauríem de establir es la viscositat cinemàtica, essencial en els càlculs que portarem a terme. El seu valor canvia amb la temperatura a la que estigui el fluid, en aquest cas aigua. Per tal de determinar-la ens basarem en el reglament de les competicions oficials. En competicions Olímpiques, Mundials i Europeus la FINA (Federació Internacional de Natació), estableix que l'aigua ha de estar entre una temperatura de 25 i 28 graus centígrads [5].

Seleccionem una temperatura de 26 graus centígrads, utilitzant la següent taula:

DENSIDAD, VISCOSIDAD DINAMICA Y CINEMATICA DEL AGUA EN FUNCION DE LA TEMPERATURA

Temperatura (°C)	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad dinámica η (10 ⁵ kg/m · s)	Viscosidad cinemática ν $10^6 \frac{m^2}{s} = cSt$
0	999,8	178,7	1,787
2	999,9	167,1	1,671
4	1,000	156,2	1,562
6	999,9	146,4	1,464
8	999,8	137,6	1,375
10	999,7	130,5	1,307
12	999,4	122,6	1,227
14	999,2	116,1	1,163
16	998,9	110,4	1,106
18	998,5	105,2	1,053
20	998,2	100,2	1,0038
22	997,7	95,5	0,95
24	997,2	91,1	0,914
26	996,6	87,2	0,875
28	996,1	83,4	0,837
30	995,7	79,7	0,801
32	994,9	76,4	0,768
34	994,2	74,1	0,745
36	993,4	70	0,705
38	992,8	68	0,685
40	992,2	65,3	0,658
45	990,2	59,8	0,604
50	988	54,8	0,554
55	985,7	50,5	0,512
60	983,2	46,7	0,475
65	980,6	43,6	0,443
70	977,8	40,4	0,413
75	974,8	37,8	0,388
80	971,8	35,5	0,365
85	968,6	33,4	0,345
90	965,3	31,5	0,326
95	961,8	29,8	0,310
100	958,4	28,2	0,295
150	916,9	18,6	0,205
200	864,6	13,6	0,161
250	799,2	10,9	0,14
300	712,4	8,91	0,132

Taula 1 Densitat, viscositat dinàmica i cinemàtica del aigua en funció de la temperatura [6].

D'aquesta forma seleccionem una densitat de l'aigua de $996,6 \text{ kg/m}^3$, una viscositat dinàmica de $87,2 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}$ i una viscositat cinemàtica de $0,875 \text{ cSt}$ o de $0,875 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Per estudiar la capa límit d'aquesta placa plana farem us de les equacions ja presentades a la part teòrica del treball:

Nombre de Reynolds:

$$Re(x) = \frac{U_{\infty} \cdot x}{\nu}$$

Gruix de la capa límit laminar:

$$\frac{\delta}{x} = \frac{5}{Re_x^{1/2}} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

Gruix de la capa límit turbulenta:

$$\frac{\delta}{x} = \frac{0,16}{Re_x^{1/7}} \quad (\text{Eq. 4.15})$$

Reynolds de transició:

$$Re_{x \text{ crit}} = \left(\frac{U \cdot x}{\nu} \right)_{\text{crit}} = 5 \cdot 10^5 \quad (\text{placa plana}) \quad (\text{Eq. 4.14})$$

Una vegada esmentades les condicions i les equacions a utilitzar procedim a fer els càlculs. El que volem saber es el tipus de capa límit que obtindrem (laminar, turbulenta o amb transició) i el gruix que tindrà aquesta.

Per començar determinarem quin seria el punt de transició en les nostres condicions. Per això farem us de la Eq. 4.14, posant com a incògnita la x_{crit} .

D'aquesta equació trobem que el punt de transició està a $0,21875 \text{ m}$ ($\sim 0,22 \text{ m}$) del inici de la placa. La capa límit laminar no es pot menysprear perquè representa més d'un 15% de la longitud de la placa.

El gruix de la capa límit laminar en aquest punt seria de $1,55 \text{ mm}$ (Eq. 4.4).

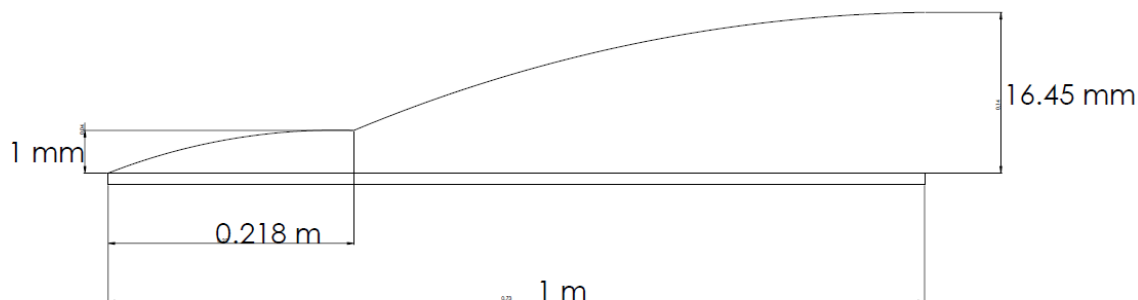
Per tal de determinar el gruix de la capa límit turbulenta hem de determinar on comença aquesta, que no és es el mateix punt que el de transició. Per obtenir-ho utilitzem la Eq. 4.15, utilitzant x com incògnita, i igualant δ al gruix obtingut de la placa límit. D'aquesta forma obtindríem la longitud que ha recorregut la capa límit turbulenta fins el punt de transició.

Obtenim que aquesta distància val 5,1 cm. Per tan ja sabem que la distància de la capa límit turbulenta serà igual a:

$$x_{turb} = l_{placa} - (x_{laminar} - x') \quad (\text{Eq. 5.1})$$

On l_{placa} és 1m, $x_{laminar}$ és 0,22 m i x' és l'última distància que hem calculat, 5,1 cm. Trobem que x_{turb} és 0,8326 m. Amb aquesta dada ja som capaços de calcular el gruix de la capa límit turbulenta, de la mateixa forma que ho hem fet amb la laminar per amb la Eq. 4.15.

El resultat obtingut sobre el gruix de la capa límit turbulenta és de 16,45 mm. Un esquemàtic de com quedaria la capa límit de la placa plana en les nostres condicions seria el següent:



Il·lustració 12. Esquema de la nostra capa límit en placa plana (les corbes de la capa límit no estan fetes a escala per millorar la visualització).

Com ja s'ha parlat en el apartat teòric 4.7, l'efecte de la rugositat distribuïda uniformement (com els riblets) introduïda en una superfície concreta, pot aportar grans beneficis en la capa límit ja que comporta una reducció en la força d'arrossegament.

Però també es veritat que canviarà el comportament i les característiques de la capa límit, i depenent de les característiques d'aquesta rugositat, pot aportar més desavantatges que beneficis.

Es per això que plantejaré diferents superfícies amb rugositats uniformes (riblets fets amb ones sinusoïdals), amb una rugositat relativa relacionada amb el gruix de la capa límit de la placa plana estudiada abans.

En concret plantejaré 3 superfícies; una amb una rugositat relativa més petita que el gruix de la capa límit laminar, una altre amb una rugositat relativa entre els gruixos de la capa límit laminar y la turbulenta, i l'última amb una rugositat relativa més gran que la capa límit.

Conseqüentment les rugositats, i per tant les amplituds de les funcions sinusoïdals seran; 1mm, 10mm i 20mm (seguint el mateix ordre d'abans).

Per tal de que les rugositats siguin proporcionades, les freqüències seran inversament proporcionals a la seva amplitud. Per exemple, si la amplitud fossi de 2, la freqüència seria de 1/2.

També he vist oportú, que les funcions comencin en el seu punt més baix, per tal de que la cara frontal de les plaques sigui lo menys roma possible, i que d'aquesta manera no afecti tant als resultats i les simulacions. Per tant haurem de restar $\pi/2$ a les funcions per quadrar-les de la forma desitjada.

Finalment les funcions de les tres plaques amb rugositats serien les següents:

Més petita que el gruix de la capa límit laminar:

$$\sin\left(x - \frac{\pi}{2}\right) \text{ mm} \quad (\text{Eq. 5.2})$$

Entre la capa límit laminar i turbulenta:

$$10 \cdot \sin\left(\frac{x}{10} - \frac{\pi}{2}\right) \text{ mm} \quad (\text{Eq. 5.3})$$

Més gran que la capa límit turbulenta:

$$20 \cdot \sin\left(\frac{x}{20} - \frac{\pi}{2}\right) \text{ mm} \quad (\text{Eq. 5.4})$$

Les simulacions ens ajudaran a veure quina te una resistència a l'avanç menor i com canvien les diferents capes límits segons la rugositat (gruixos, transició...).

5. Simulacions.

5.1. Preparació Simulacions (Solidworks).

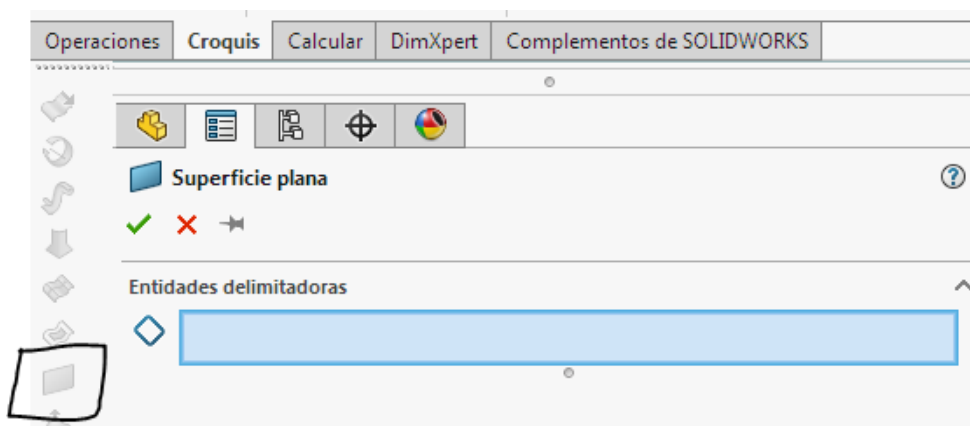
Per poder estudiar les diferents superfícies amb rugositats uniformes i extreure uns resultats concloents utilitzarem el programa ANSYS FLUENT. En aquest estudi s'ha fet servir la versió del programa que està a les aules informàtiques de l'escola. Aquesta versió és acadèmica, i per tant té bastantes limitacions, com per exemple el número de nodes al crear la malla o la velocitat i fluïdesa del programa a l'hora de fer els diferents càlculs.

Un altre problema d'aquest programa es que en el seu editor de geometries no es poden crear formes molt complexes. En el nostre cas, volíem crear la rugositat uniforme fent una sinusoide que omplís tota la placa. Per això, s'ha decidit dissenyar les superfícies en el programa Solidworks.

També cal dir que farem primer les simulacions en 2D, per facilitar l'estudi de tantes superfícies, ja que el mallat és molt més senzill y el programa funciona molt més ràpid. Una vegada fetes, es farà la simulació 3D sobre la superfície que obtingui uns millors resultats. D'aquesta manera podrem entendre millor el seu comportament i veure que ha canviat respecte el model teòric.

El procediment en el Solidworks, serà crear un croquis 2D amb les formes de les superfícies desitjades. Per les superfícies en 2D, inserim una superfície en aquests croquis per tal de que la conversió entre els dos programes es realitzi correctament (guardant-lo com IGES en el Solidworks).

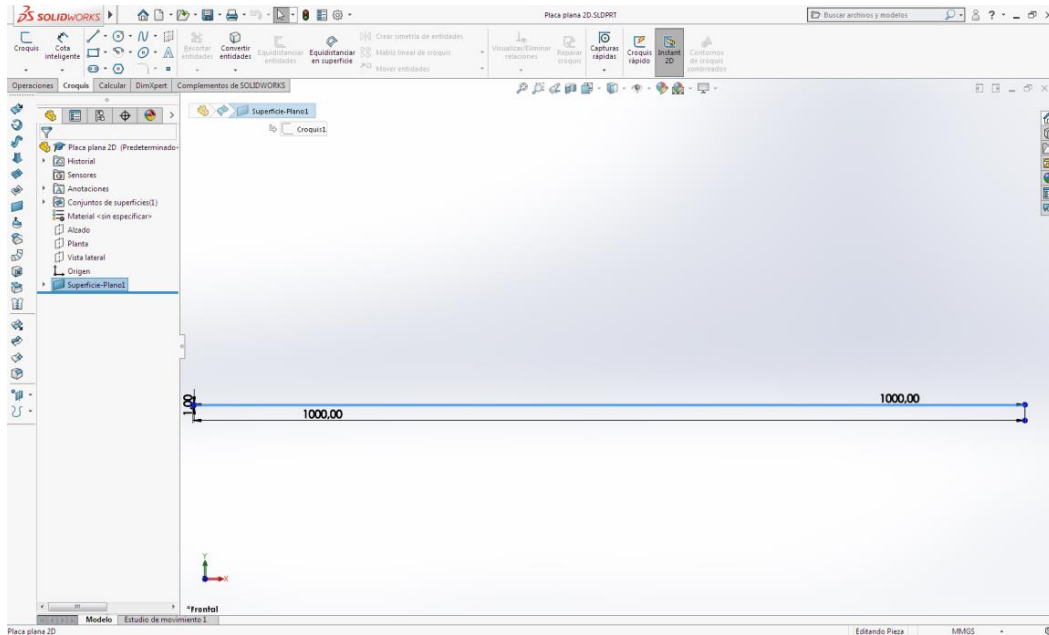
Per les superfícies en 3D, extruirem el croquis 2D fins una longitud de 1m, obtenint una placa de 1mx1m.



Il·lustració 13. Inserir superfície en croquis Solidworks

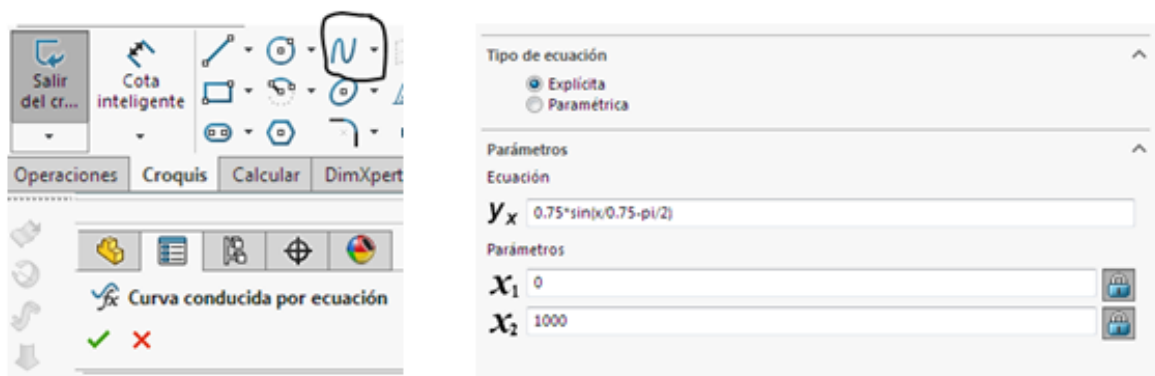
Primer crearem la placa plana base, que representarà la teòrica que hem estudiat abans. Igual que la placa teòrica tindrà 1m de longitud. En el cas ideal per l'estudi de capa límit en la placa plana l'alçada no existeix, es lo més fina possible, en el nostre cas ficarem un 1mm d'alçada, que comparat amb la llargada es infinitament més petita.

El model seria el següent:



II-lustració 14. Placa plana 2D.

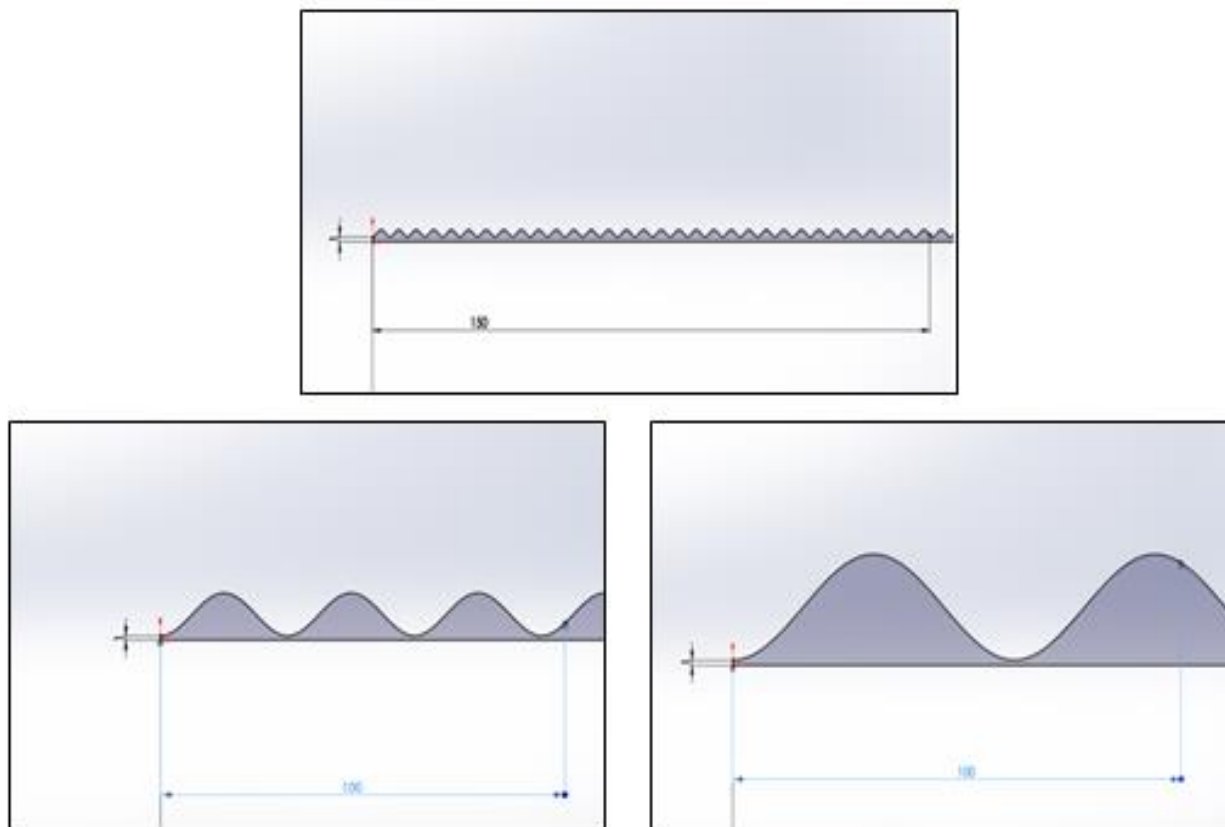
A partir d'aquesta base, per recrear les superfícies amb rugositat, substituïrem la línia superior del croquis per una línia que segueixi el comportament d'una funció sinusoïdal, utilitzant la opció *corba conduïda per equació* (dins de spline en el Solidworks). Seleccionem l'opció explícita, i introduïm la funció sinusoïdal dins de l'apartat equació, i els punts d'inici i final en paràmetres.



II-lustració 15. Solidworks menús per crear una corba conduïda per una equació.

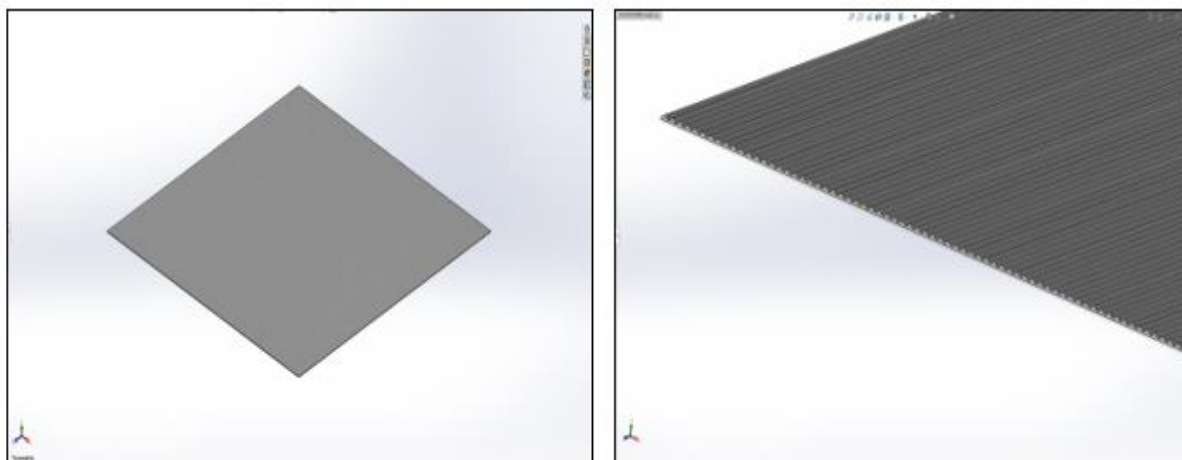
Introduiríem conseqüentment les funcions que vam presentar en l'apartat 5, i els paràmetres seleccionats serien de 0 a 1000mm, per quadrar amb la llargària de la placa base.

Obtindríem les següents geometries en 2D:



Il·lustració 16. Visualització de 15cm de les quatre superfícies en SolidWorks.

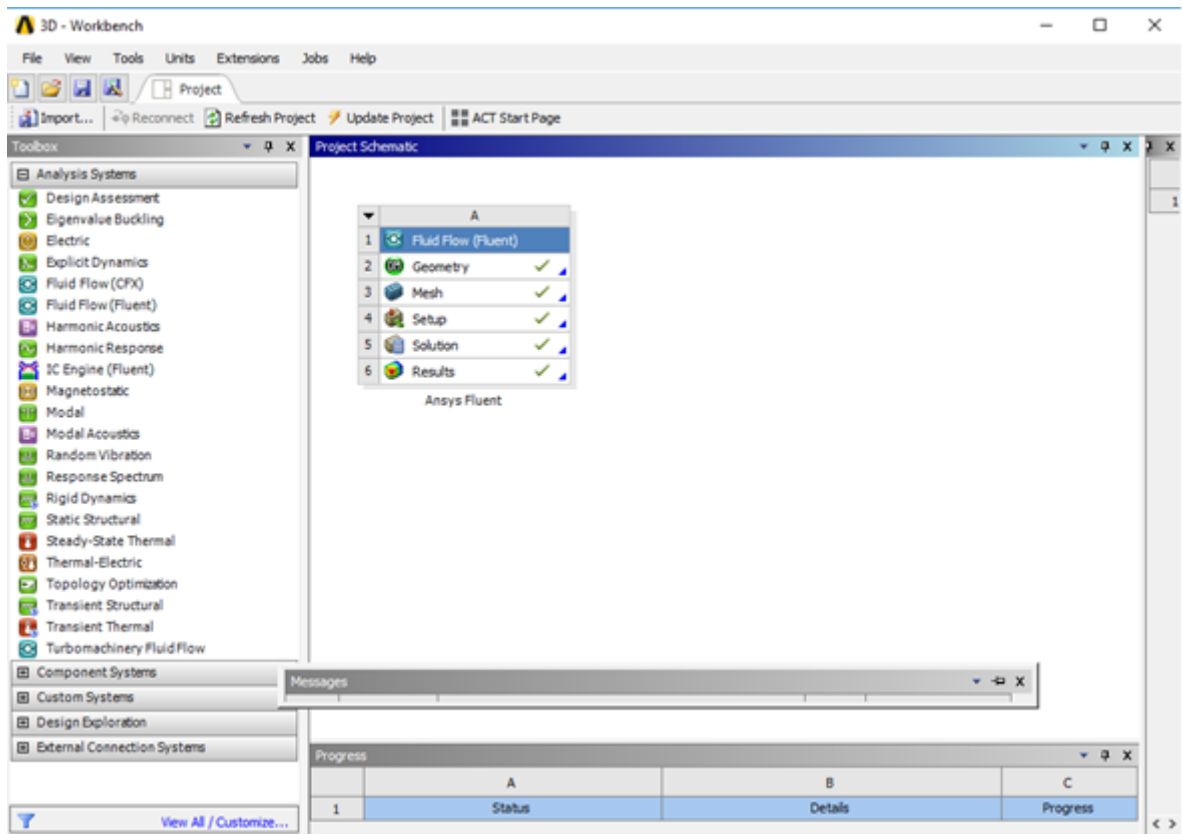
I d'aquesta manera quedaria la placa en 3D:



Il·lustració 17. Placa 3D 1mx1m.

5.2. Simulacions en ANSYS.

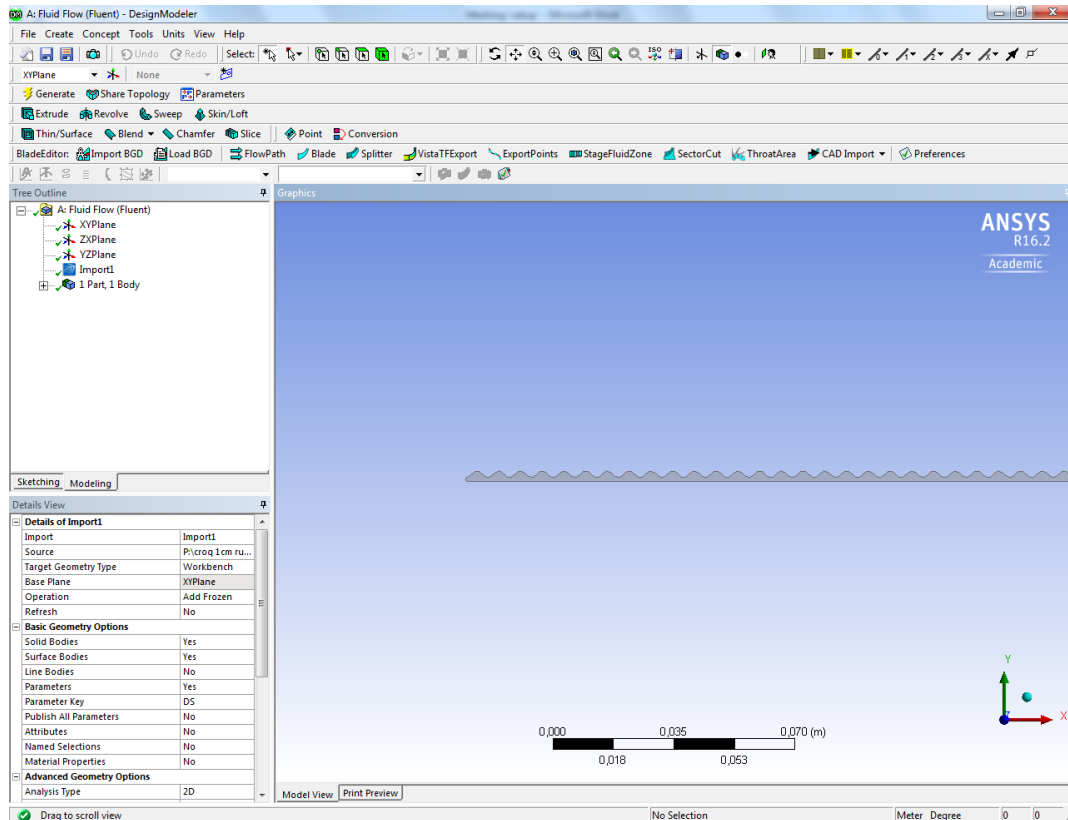
Una vegada fetes totes les geometries, podem començar a simular amb l'ANSYS. En primer lloc, es defineix el tipus de sistema que es voldrà emprar, a la pantalla principal del Ansys. En aquest cas, se selecciona la vessant Fluid Flow (Fluent).



Il·lustració 18. Menú principal ANSYS FLUENT.

Per tal de resoldre el problema correctament, s'han de seguir tots els apartats per ordre de dalt a baix. En el nostre cas els passos Geometry, Mesh, i Set Up seran els mateixos per les tres superfícies 2D, per això només es mostraran les il·lustracions sobre una concreta. Per els cas 3D farem petites distincions en els apartats que siguin diferents.

Començarem carregant la nostra superfície a Geometry, i clicarem per editar-la dins del DesignModeler. Aquest programa és un editor on es pot dibuixar la geometria directament o es poden carregar unes altres. Una vegada dins clicarem a generate, per tal de generar la geometria carregada:

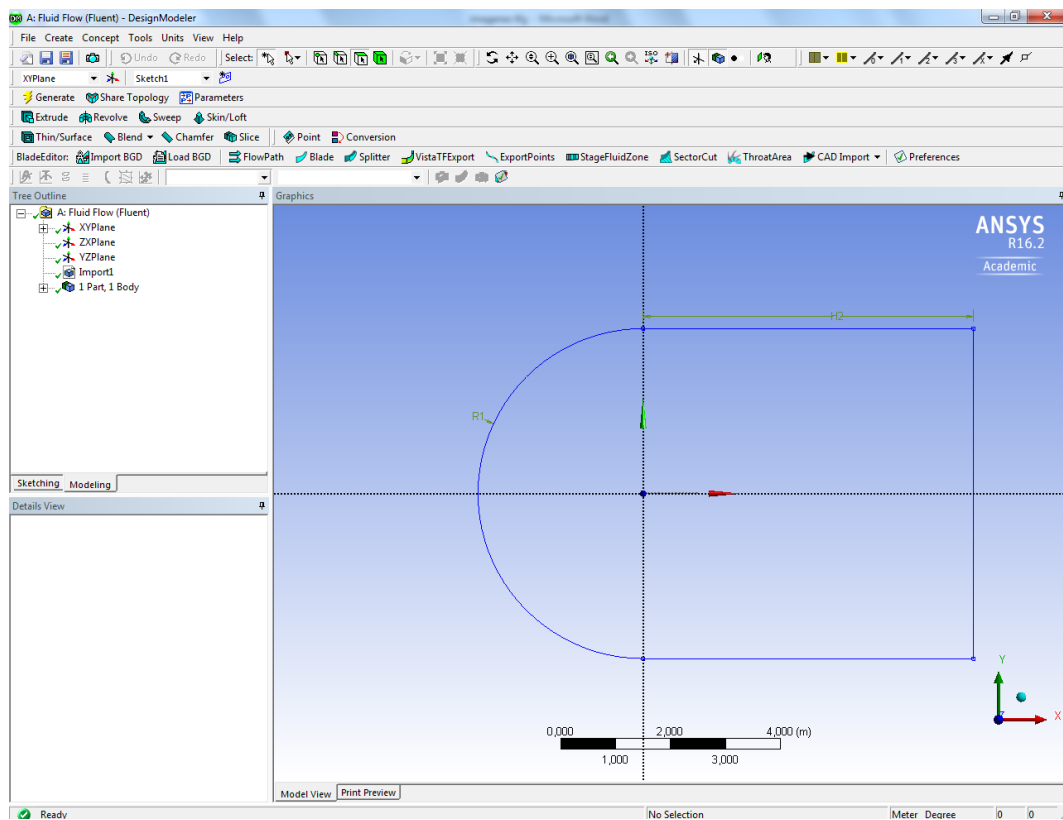


Il·lustració 19. Geometria carregada al DesingModeler.

En el cas 2D, el que haurem de dibuixar serà el domini del fluid.

Haurem de seleccionar sketching i dibuixar el domini en el mateix pla que la nostra superfície. Amb l'eina draw dibuixem un cercle al voltant de la placa, i un quadrat amb costats tangents al cercle.

Utilitzant l'eina trim, dins de modify, eliminem les línies sobrants, i en dimensions li donem la grandària desitjada. Per a nosaltres la sortida del domini serà 6 vegades més gran que la placa, i el radi de la circumferència serà de 3 longituds de la placa (6 i 3 metres). Aquests son valors recomanables que s'acostumen a utilitzar en simulacions d'aquest estil.

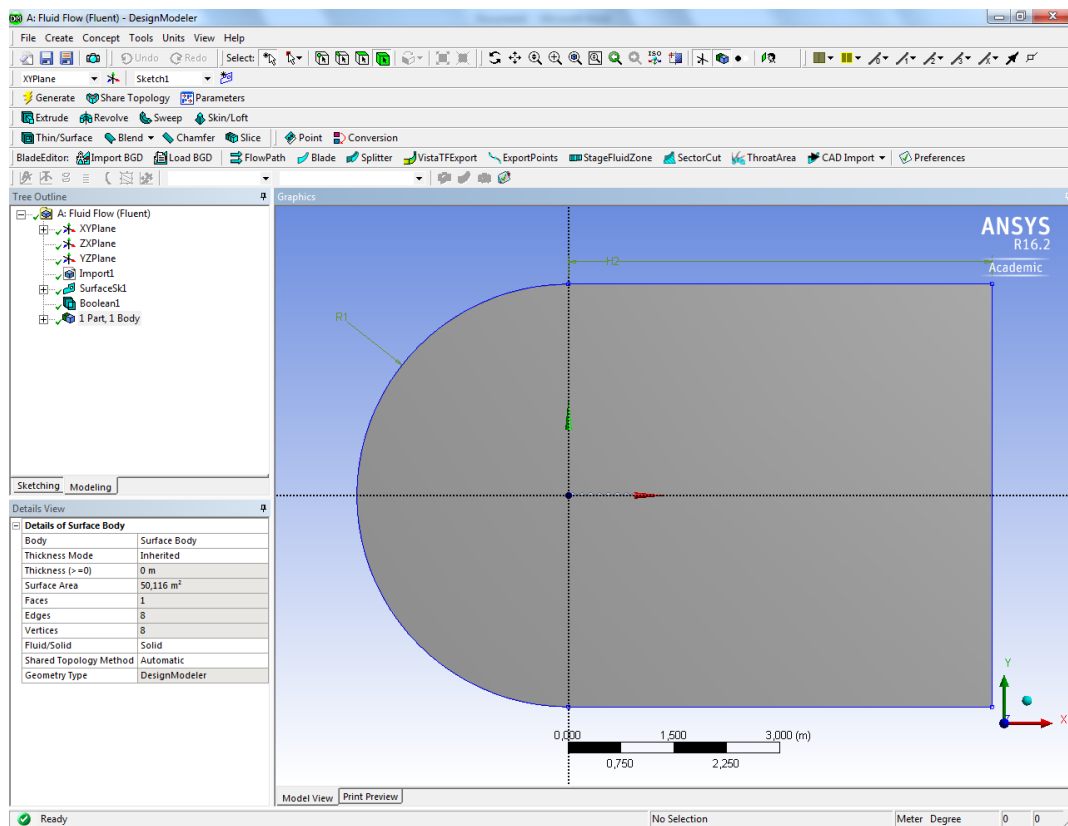


Il·lustració 20. Domini del fluid dibuixat al DesignModeler.

El següent pas serà crear la superfície del domini. Semblant al que hem fet al SolidWorks, dins de Concept, seleccionem Surfaces From Sketches i seleccionem el nostre sketch.

Després haurem de fer la resta de les dues superfícies, seleccionem Boolean dins de Create, i marquem l'opció substrat, marcant les nostres dues superfícies, i obtenim la *Il·lus 21*.

En el cas 3D el que haurem de fer es crear un Enclousure al voltant de la nostra superfície (crea un domini de qualsevol forma geomètrica envoltant la teva peça). Nosaltres hem escollit un prisma rectangular, d'unes mesures de 3m de profunditat (direcció del flux x), una amplada de 2m i una altura de 1m. Després fem la mateixa operació booleana que en el apartat 2D.



Il·lustració 21. Superfície final del nostre domini en DesignModeler.

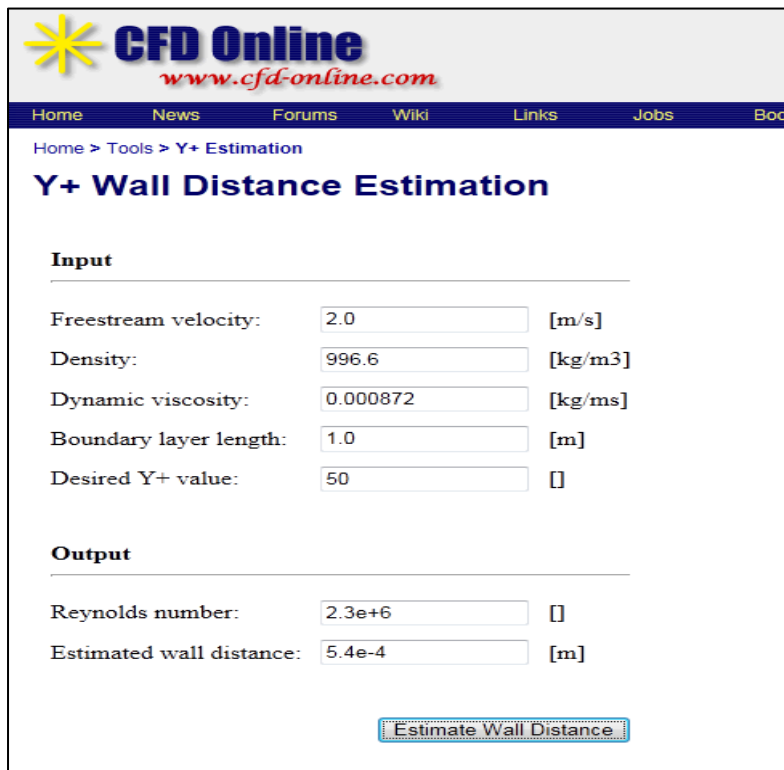
El següent pas és fer el mallat. Entrant dins de Mesh, obrirem una finestra anomenada Meshing per fer el mallat. A continuació explicarem tot el procediment per el mallat 2D. Per el cas 3D, haurem de seguir els mateixos passos, les coses que canvien es que el domini del fluid passa de superfície a volum, les condicions de contorn d'arestes a superfícies i la malla en comptes de estar composta per triangles està per composta per tetraedres.

Lo primer que farem dins del Meshing és escollir les condicions de contorn del nostre problema. Per a fer això seleccionarem tot el contorn del domini de fluid i l'anomenarem, utilitzant l'opció Create Named Selection. Com que aquesta condició és una condició de contorn obert a l'atmosfera i a la vegada d'entrada de flux, l'anomenarem com "velocity_inlet". Aquest és el nom amb el que el software Fluent reconeix aquest tipus de condició de contorn.

Es important mencionar, que en el cas 3D aquesta condició de contorn velocity_inlet, serà aplicada a la base per on entri el fluid, i s'anomenarà pressure_outlet en la cara de sortida. Seran factors importants de cara al Setup.

Després d'això definirem el tipus de malla dins de Mesh Control, seleccionant Method. En 2D tenim dues opcions, quadrats o triangles. Per tal de que s'adapti millor a les nostres superfícies amb rugositats escollim els triangles (tetraedres en 3D).

El següent pas serà definir la capa límit dins del mallat. Per això utilitzarem la calculadora de mida de la primera cel·la [7]. Haurem d'introduir la velocitat del flux a l'infinit, la densitat i viscositat del fluid (aigua a 26 graus centígrads), la longitud característica i el valor de y^+ desitjat. En el nostre cas queda:



CFD Online
www.cfd-online.com

Home News Forums Wiki Links Jobs Bool

Home > Tools > Y+ Estimation

Y+ Wall Distance Estimation

Input

Freestream velocity: 2.0 [m/s]
 Density: 996.6 [kg/m3]
 Dynamic viscosity: 0.000872 [kg/ms]
 Boundary layer length: 1.0 [m]
 Desired Y+ value: 50 []

Output

Reynolds number: 2.3e+6 []
 Estimated wall distance: 5.4e-4 [m]

Estimate Wall Distance

Il·lustració 22. Calculadora de mida de la primera cel·la de la capa límit [7].

Obtenint el valor de 0.54 mm per la mida de la primera cel·la. Sabent que creix a un ratio de 1.2 i que la nostra capa límit al final de la placa mesura 16.45, determinem que necessitarem com a mínim 11 cel·les. Introduïm aquestes dades al programa fent un Mesh Control-Inflation i seleccionem el següent:

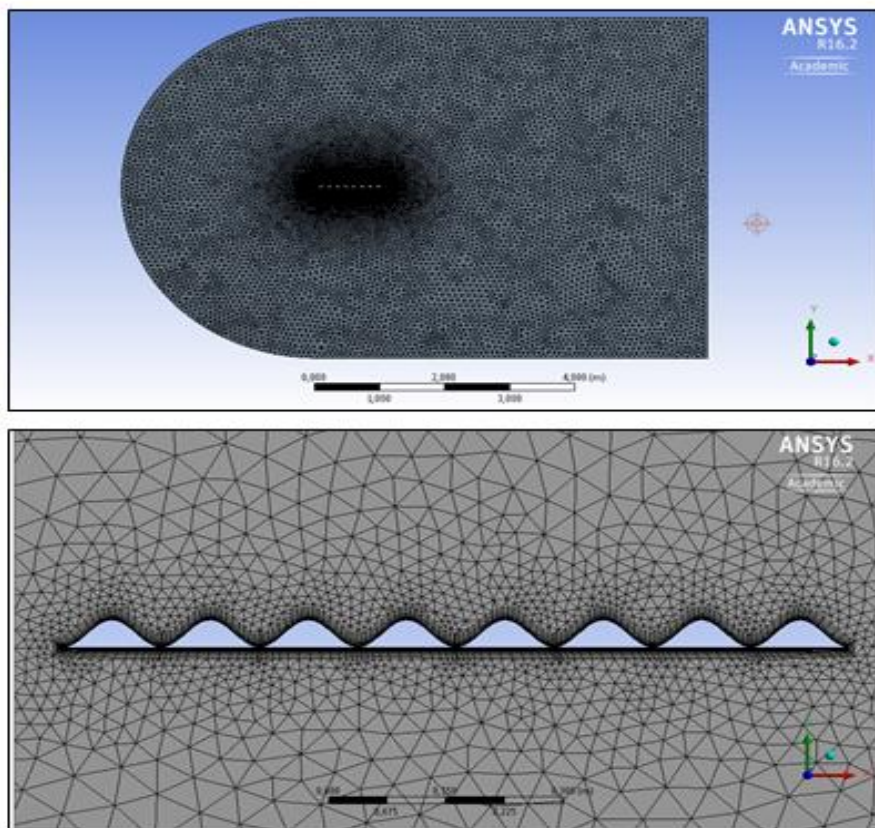
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Definition	
Suppressed	No
Boundary Scoping Method	Geometry Selection
Boundary	4 Edges
Inflation Option	First Layer Thickness
<input type="checkbox"/> First Layer Height	5,4e-004 m
<input type="checkbox"/> Maximum Layers	11
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre

Il·lustració 23. Mesh Control- Inflation.

Per acabar de controlar la mida dels elements i per tant del mallat farem uns Sizing (dins de Mesh control també), un del domini del fluid de 0.08m, un altre sobre les línies de la nostre superfície de 0.02m.

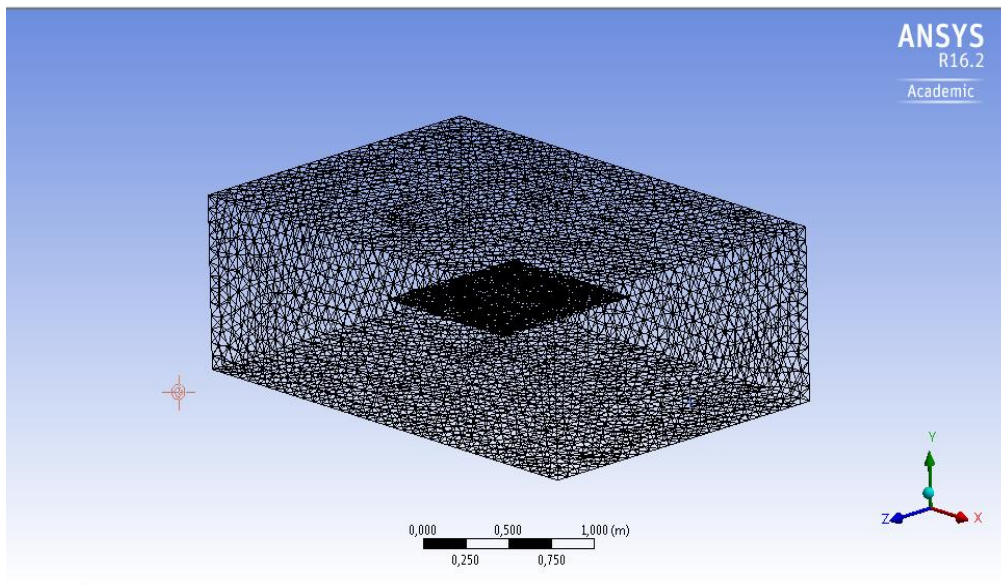
Finalment, hem estudiat diferents tipus de malles, perquè degut a aquestes els resultats poden variar. Nosaltres seleccionem les propietats de la malla que ens facilitin una millor adaptació a les superfícies i provoquin un mallat més acurat. Per això, seleccionant Mesh, i dins del subapartat sizing, posem el Relevance Center a l'opció Fine i un nivell High d'Smoothing.

Sotes aquestes condicions obtenim el següent mallat en 2D:



Il·lustració 23. Mallat de la nostra peça.

Per el model 3D obtenim el següent:

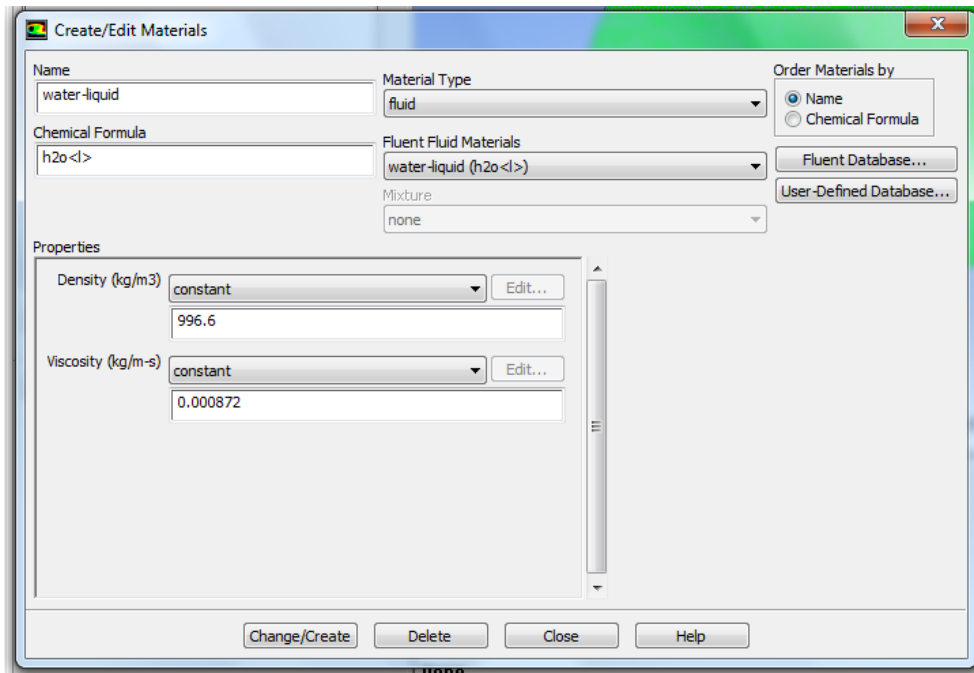


Il·lustració 24. Mallat de la superfície 3D.

El següent pas serà fer el Setup. En aquest apartat crearem el model de simulació, fent ús del Fluent.

En l'Ansys Fluent apareixen diferents tipus de models de viscositat. Ens dona a escollir entre models no viscosos, o laminars o models turbulents. Nosaltres agafarem un d'aquests últims, ja que la nostra capa límit teòrica és en la seva majoria turbulenta. De models turbulents el programa ofereix diferents com el k-epsilon, el k-omega, el transition k-kl-omega o el transition SSt. Com hem utilitzat un inflacion dins del mallat, el nostre model ha de ser el k-epsilon.

Seguidament dins de Materials haurem de crear el del nostre fluid, aigua líquida. Ho fem seleccionant-ho des de la Fluid Database, i canviem les seves característiques per les de la nostra temperatura:

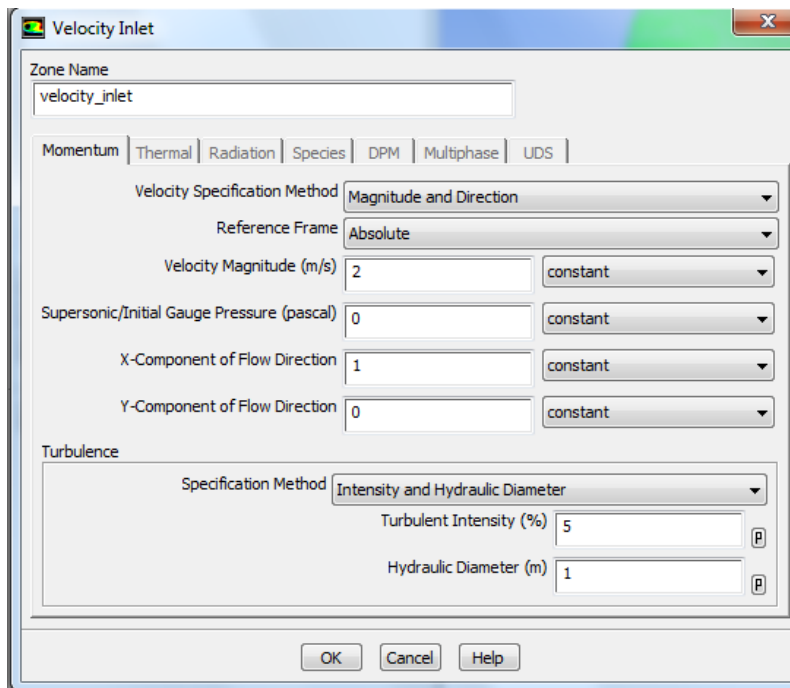


Il·lustració 25. Selecció del material, Setup

A continuació, haurem de definir la nostra malla amb les característiques del fluid que hem ficat, dins de Cell Zone Conditions.

En el apartat de Boundary Conditions hem de definir les propietats de la condicions de contorn del nostre estudi. I utilitzarem aquelles arestes o superfícies que vam anomenar a propòsit en el mallat.

Per el 2D només definirem la condició velocity_inlet que vam presentar prèviament al Meshing. Per el nostre estudi utilitzarem 'Magnitude and Direction', introduint la velocitat del flux i la seva direcció (2 m/s i en la direcció de x). Els paràmetres Turbulent Intensity i Hydraulic Diameter (Longitud característica) només s'utilitzen per donar el primer valor a K i epsilon en les equacions del model de turbulència.

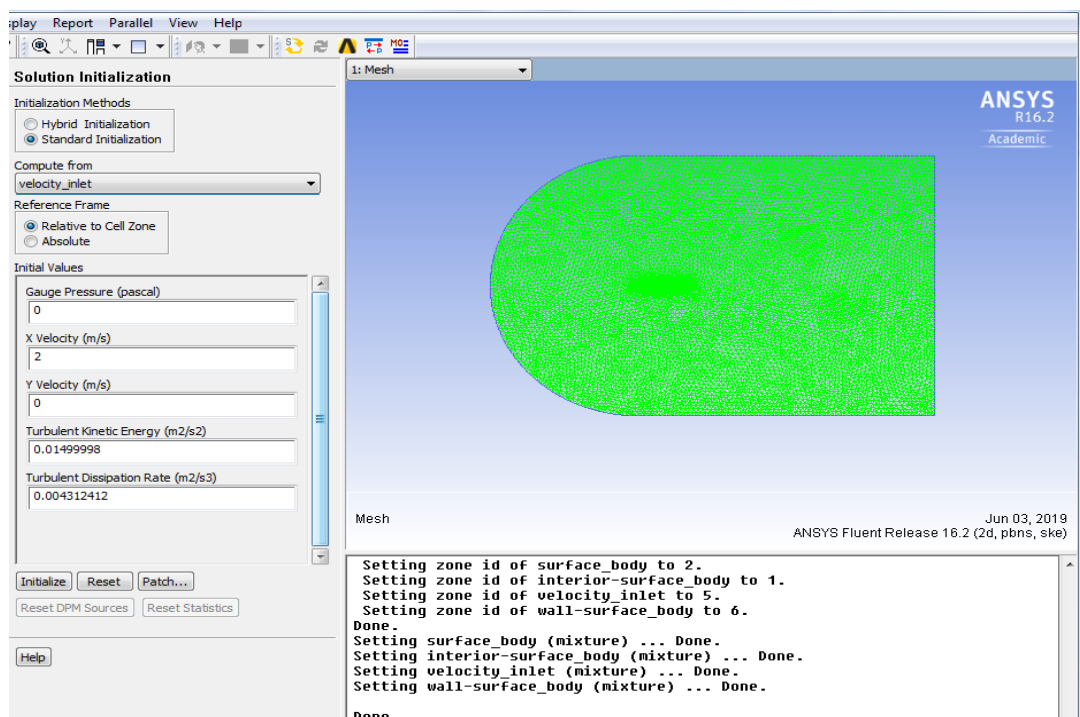


Il·lustració 26. Definició velocity_inlet.

Per el cas 3D, utilitzem el mateix procés que per el 2D però afegint la condició de contorn pressure_outlet, que ja estarà definida com una condició de pressió de sortida. Per això deixem la pressió de 0 atm que ja ve definida i posem els mateixos paràmetres de Turbulent intensity i Hidraulic diameter.

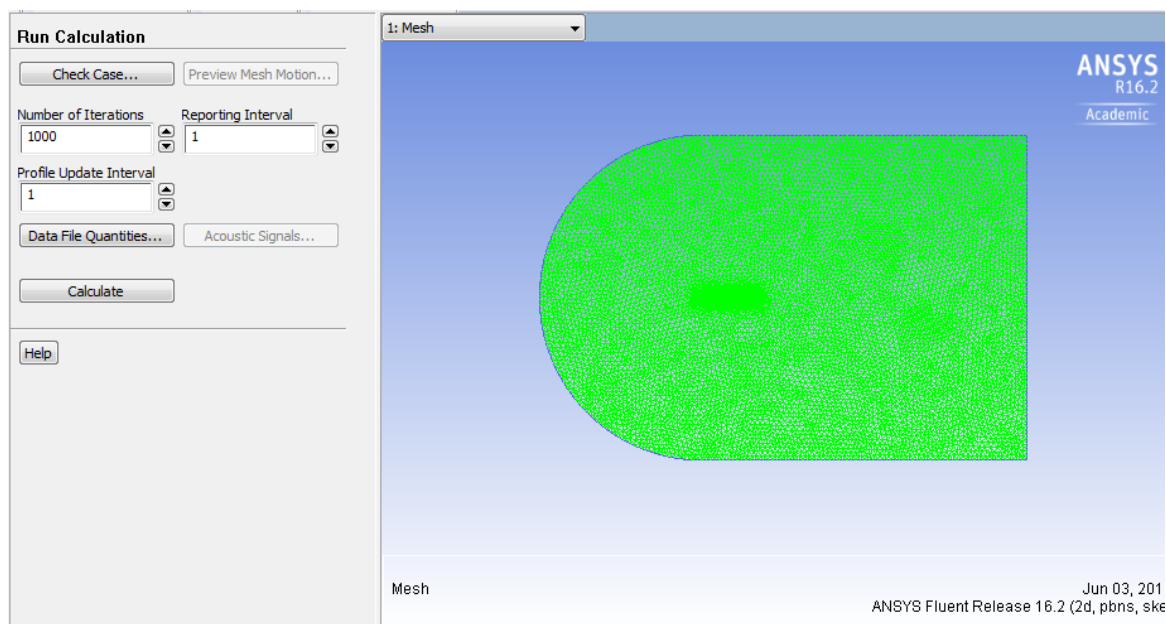
Després en Reference Values, agafem com referència la condició velocity_inlet. Només hauríem de canviar la temperatura, que fiquem la establerta a l'estudi, 26 graus centígrads o 300 graus Kelvin.

Fem una Inicialització (dins de Initialization lògicament) Standard, amb els valors de la condició de contorn velocity_inlet:



Il·lustració 27. Initialization

Per últim fem Run Calculation amb un nombre d'iteracions grans (1000 en el nostre cas), per tal de que convergeixi sol (per defecte convergirà si els residus són menors a $1e-3$).



Il·lustració 28. Run Calculation.

6. Resultats.

Primerament observarem els resultats 2D, i consegüentment després en 3D.

Una vegada el Fluent ha convergit, el càlcul ha finalitzat i s'obtenen els valors del CL i CD, els coeficients de sustentació i resistència a l'avanç respectivament. En el nostre cas, serà important fixar-nos en el CD, ja que serà el que ens indiqui quina superfície oposa més resistència.

El resultats obtinguts dels coeficients en les tres simulacions són els següents:

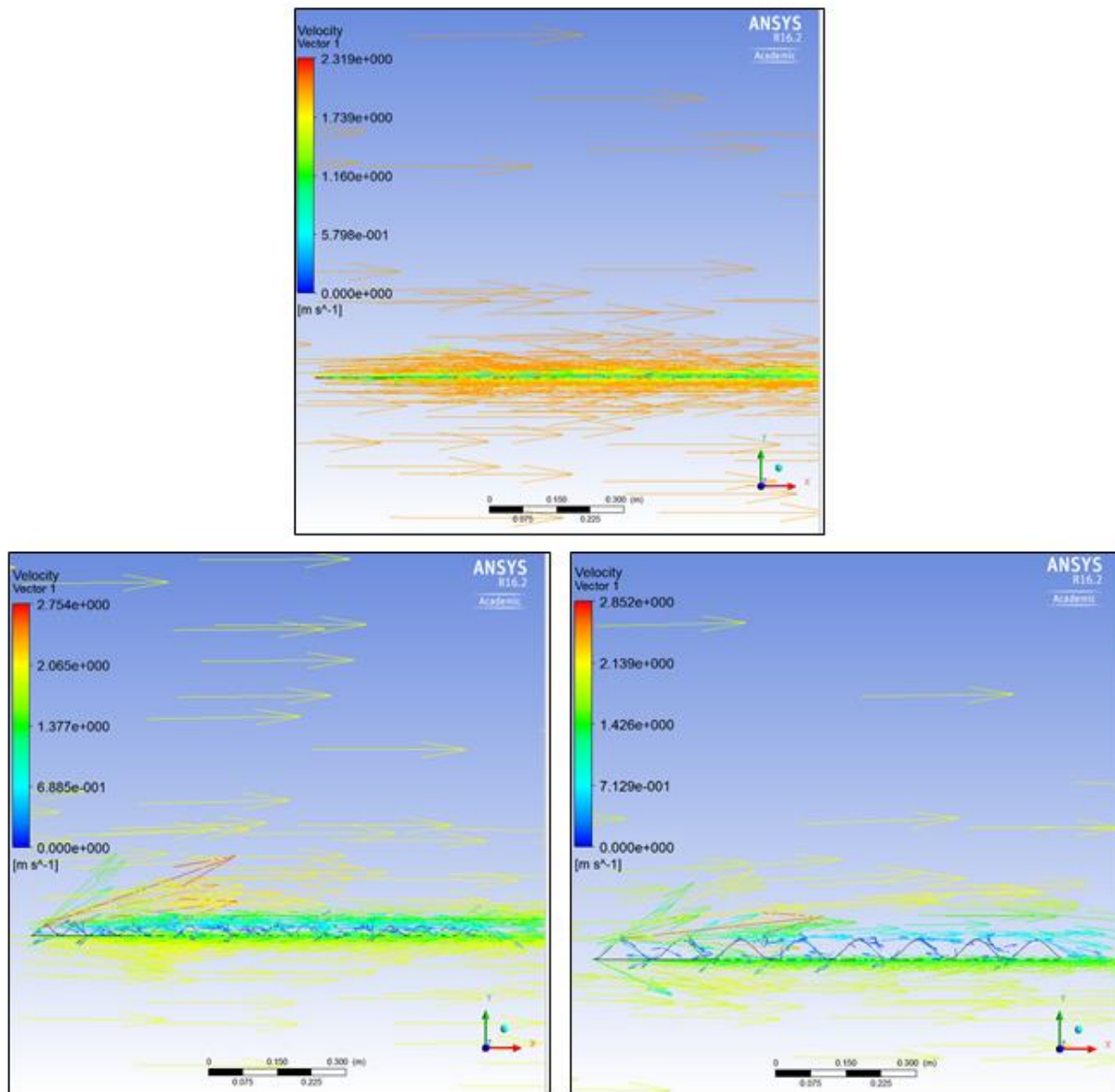
Rugositat \ Coef.	CL	CD
1mm	2.1090e-02	1.5303e-02
1cm	9.6998e-02	3.8193e-02
2cm	8.3136e-02	4.4714e-02

Taula 2. Coeficients de les plaques amb rugositat.

Seguidament entrem en l'última pestanya del projecte de l'Ansys Fluent, Results. En aquest apartat podrem veure diferents gràfiques de les nostres superfícies atenent diferents magnituds o característiques del estudi; com per exemple vectors de velocitat, contorns de pressió ...etc.

En cada gràfic sobre una magnitud o propietat en concret mostrarem les tres plaques a la vegada (a mateixa escala) per poder fer millor la comparació.

Vector de velocitats (Reduction Factor 15):

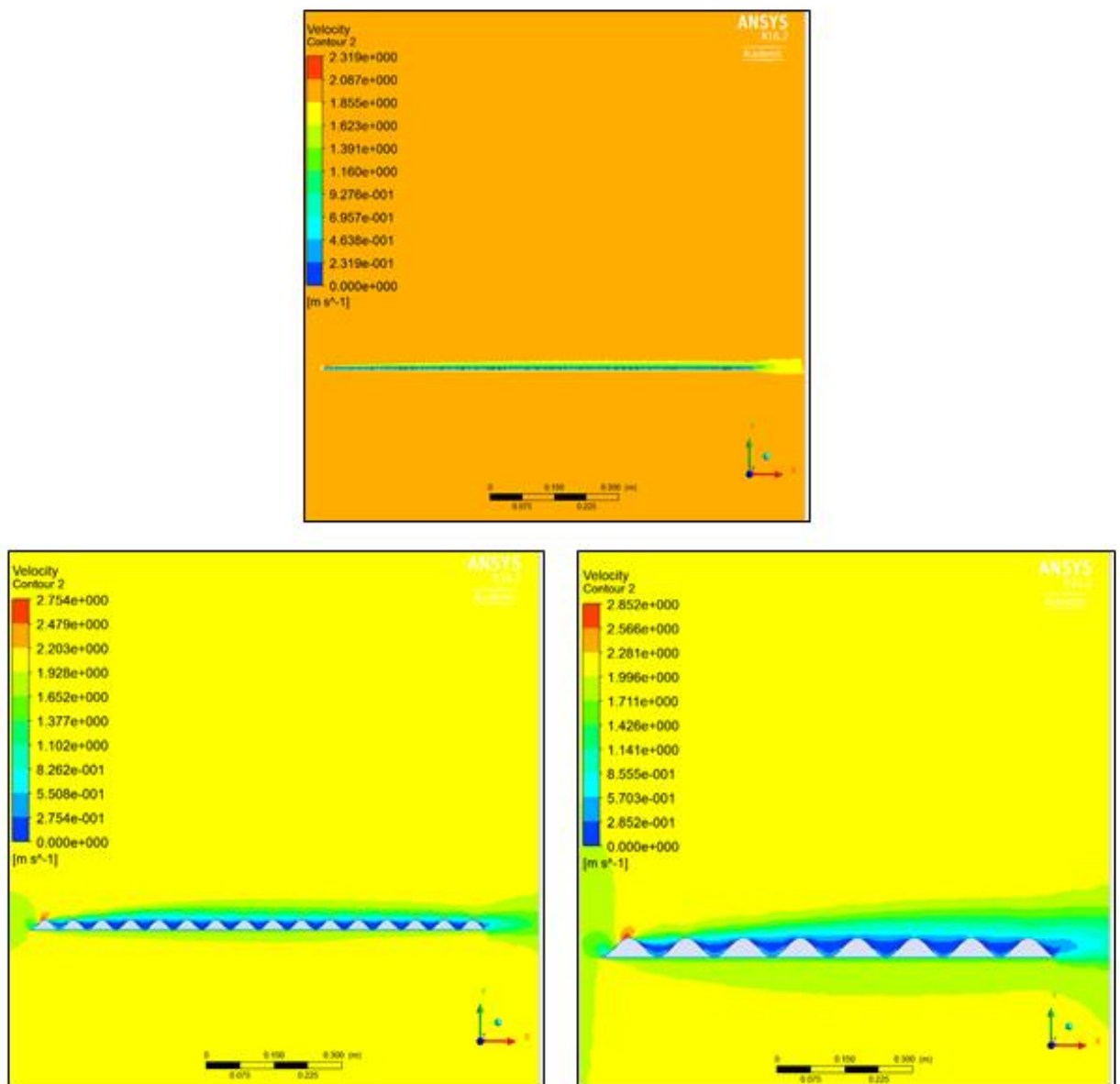


Il·lustració 29. Vectors de velocitats (Reduction Factor 15)

Las velocitats màximes que observem són: 2.32 m/s (rug. 1mm), 2.75 m/s (rug. 1cm) i 2.85 m/s (rug. 2cm).

Contorns de Velocitat:

Encara que ja ens hàgim fixat en aquesta magnitud en el gràfic d'abans, veure el seu contorn ens ajuda molt deduir el grossor de la capa límit i on més o menys es dona la transició.

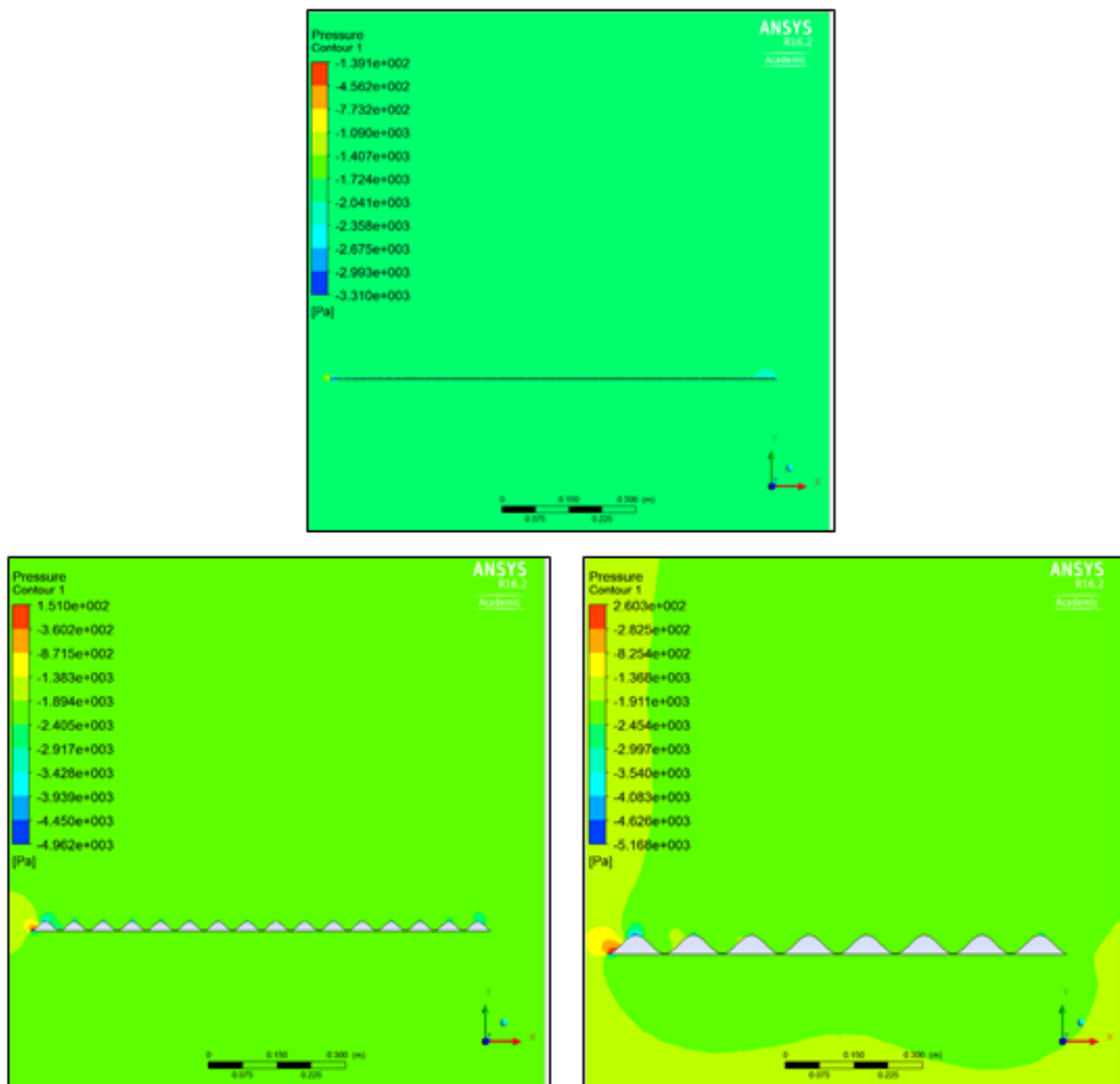


Il·lustració 30. Contorns de velocitat

El gruix de la capa límit en la placa de rugositat de 1mm, es molt petit, i quasi constant a tota la placa. Sembla que sigui tota turbulenta, o que la transició es doni molt a prop del inici de

la placa. En la de rugositat d'un 1cm, el gruix és molt visible i es pot observar com s'estabilitza a partir de del tercer o quart vall, fent us de la escala a uns 15 o 20 cm de l'inici. Per últim, en la placa de 2cm de rugositat, el gruix es el més gran i sembla que no s'arribi a estabilitzar. Suposem que la transició, si n'hi ha es dona més o menys a meitat de la placa, que és on es veu més irregularitats.

Contorns de Pressions:



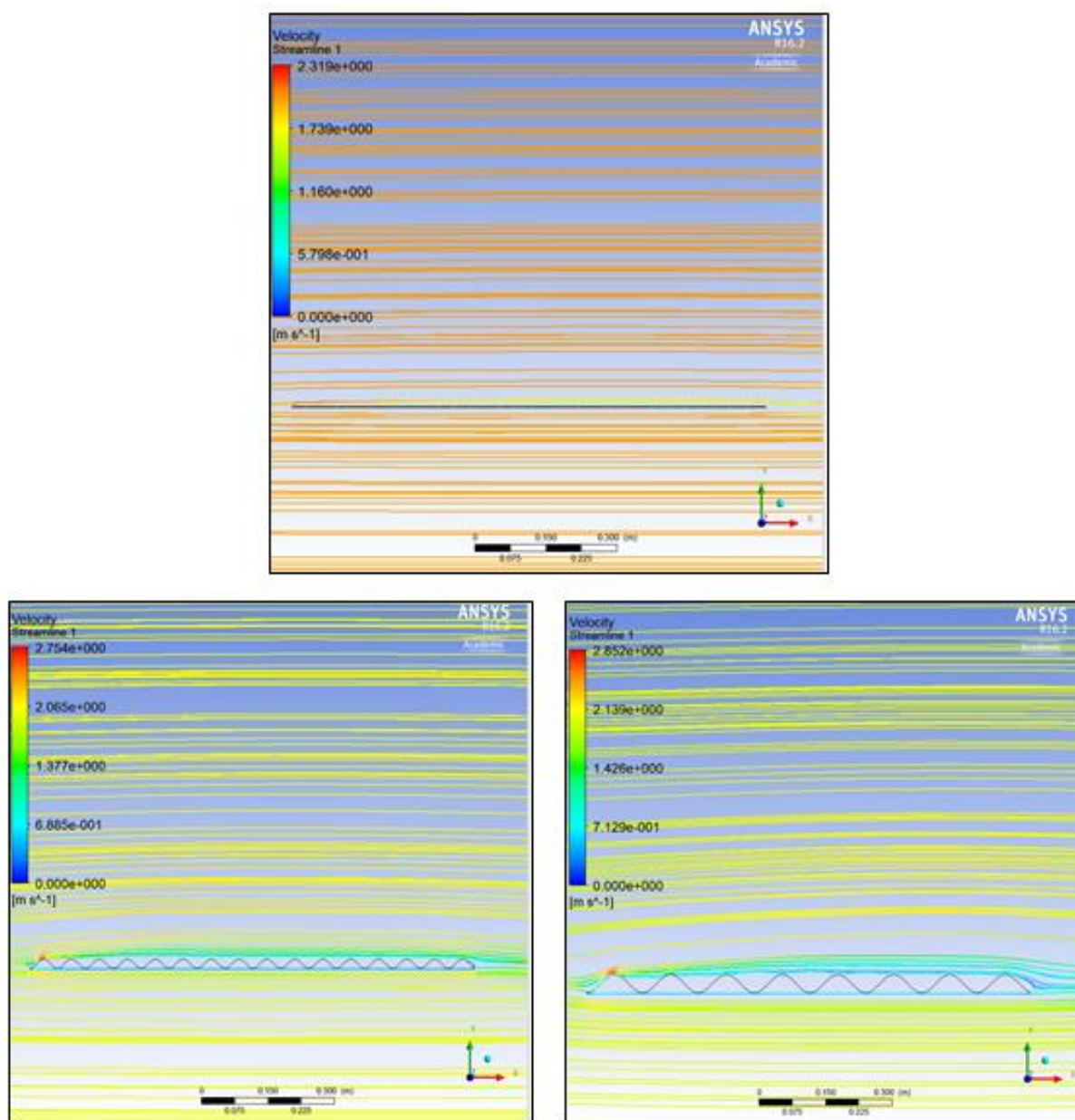
Il·lustració 31. Contorns de Pressió

Les pressions màximes que s'observen són: 151 Pa en la placa amb rugositat d'un 1cm i de

260.3 Pa en la de 2cm

Les depressions màximes que trobem són: -3310 Pa en la d'1mm de rugositat relativa, -4962 en la de 1cm i -5168 en la de 2cm.

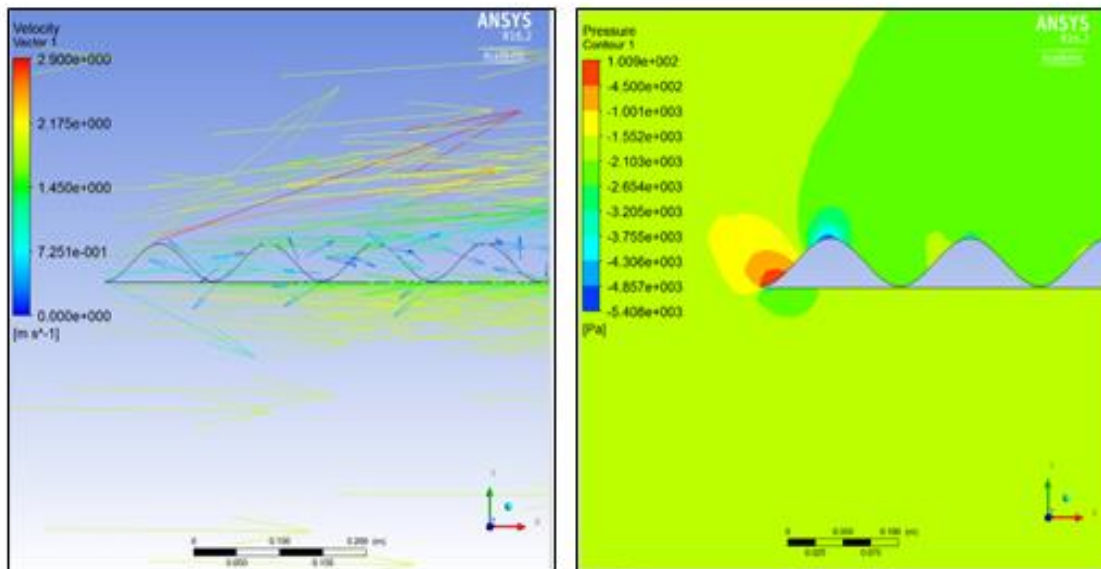
Línies de corrent:



Il·lustració 32. Línies de Corrent

Ens permeten aclarir les nostres deduccions inicials sobre la capa límit. En el nostre cas confirmen el que havíem dit prèviament.

Per finalitzar amb l'estudi 2D m'ha semblat oportú mostrar com es produeixen les depressions i remolins dels vectors de velocitat en el valls dels riblets (en la superfície de rugositat d'1cm)



Il·lustració 33. Zoom sobre la placa amb rugositat relativa d'1cm

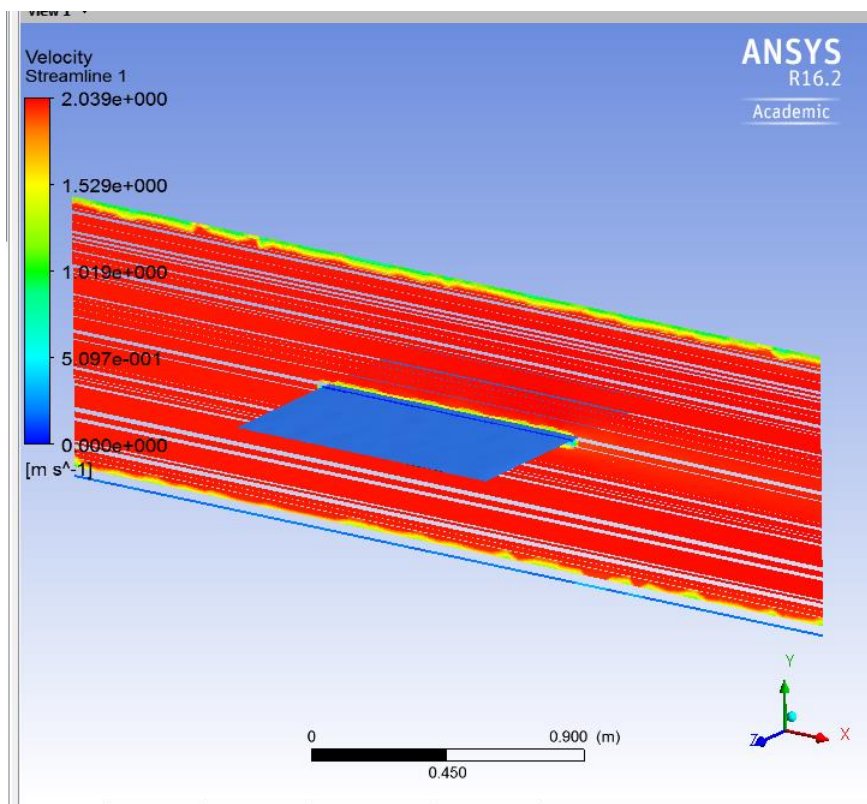
En funció d'aquests resultats, es decideix fer l'estudi 3D sobre la placa d'1mm de rugositat, ja que té el millor comportament de la capa límit.

Els coeficients CL i CD de la placa en 3D han sigut $2.695e-4$ i $2.595e-2$. El CL difereix bastant del cas 2D, mentre que els CD són del mateix ordre.

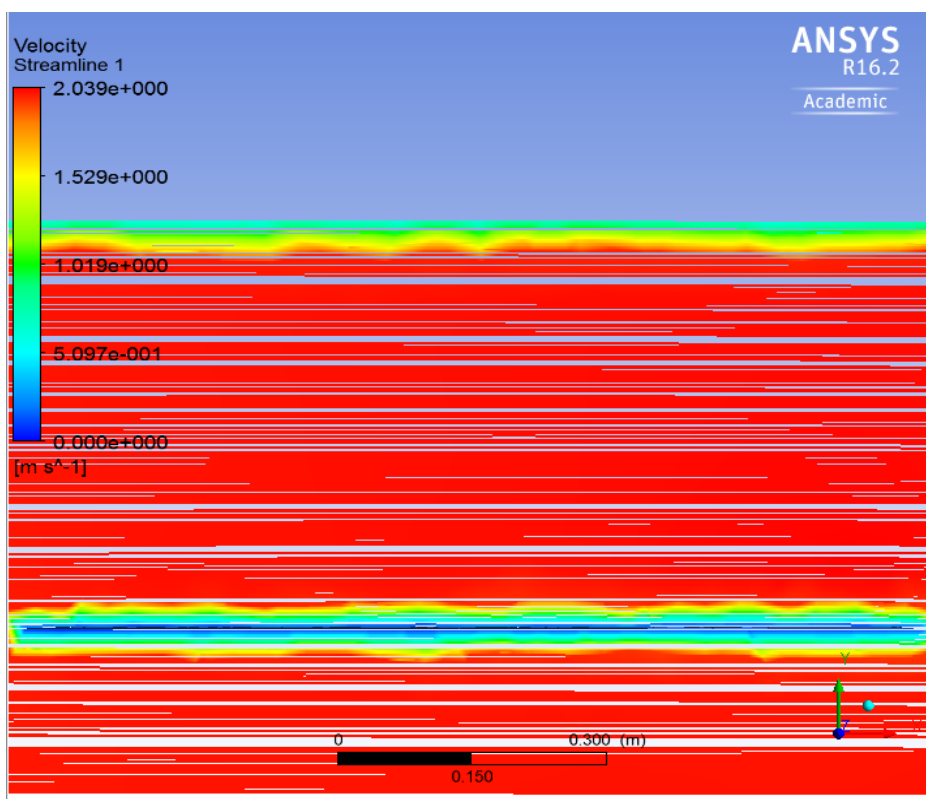
Per visualitzar millor els resultats he creat dos plans dins del visualitzador de resultats, que es poden moure a voluntat (Isosurface). Un perpendicular a la direcció z (segons els eixos de coordenades de les imatges) i un altre perpendicular al eix y .

El primer l'he deixat fix a la meitat de la placa. Per contraposició el segon l'he mogut entre la posició $y = 1cm$ i $y = 2cm$, per un motiu que explicaré més endavant.

Línies de corrent pla perpendicular a Z (direcció del flux de esquerra a dreta):

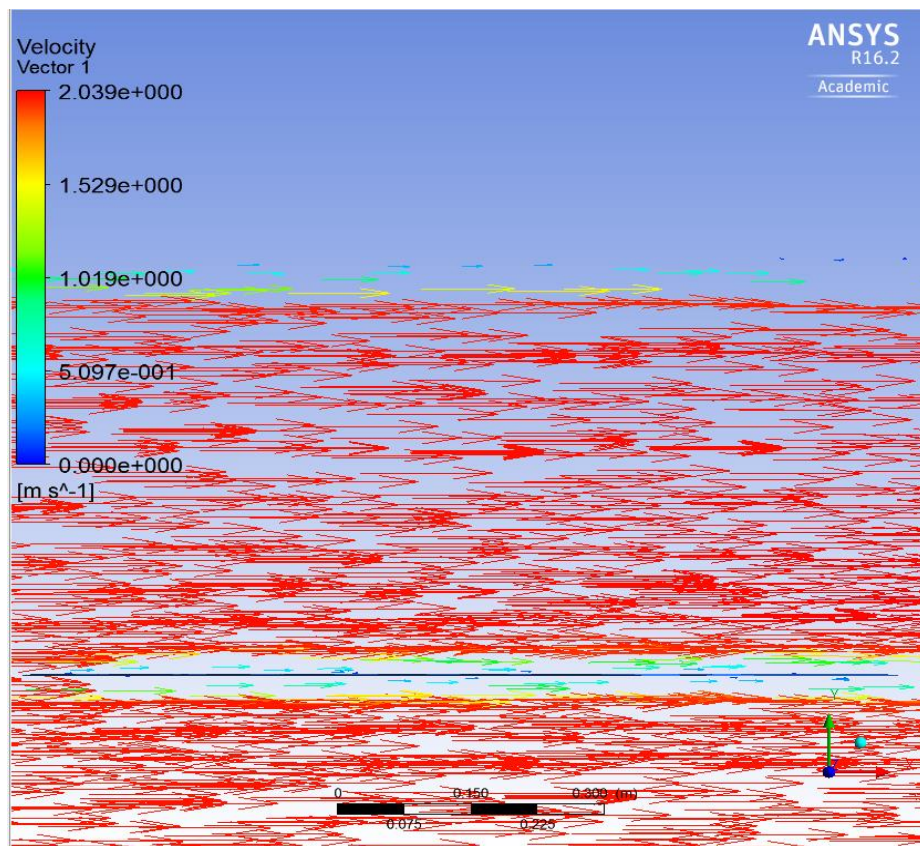


Il·lustració 34. Línies de corrent en el pla perpendicular a z (Visió Isomètrica).



Il·lustració 35. Línies de corrent en el pla perpendicular a z (Visió Frontal).

Vectors de Velocitat pla perpendicular a Z (direcció del flux de esquerra a dreta):

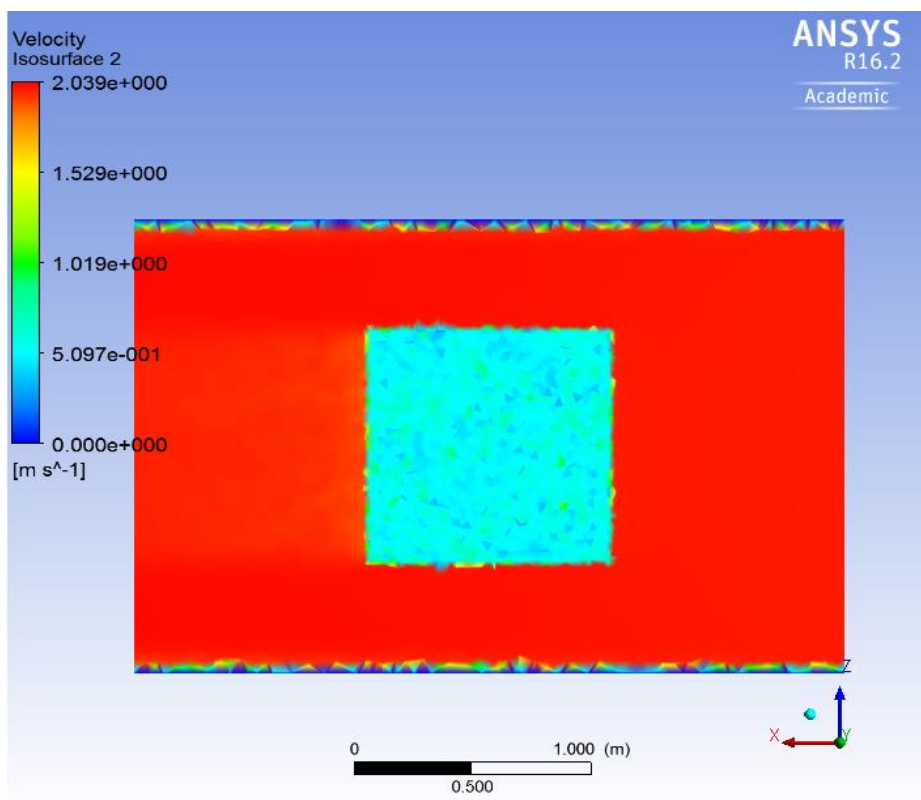


Il·lustració 36. Vectors velocitat en el pla perpendicular a z (Visió frontal).

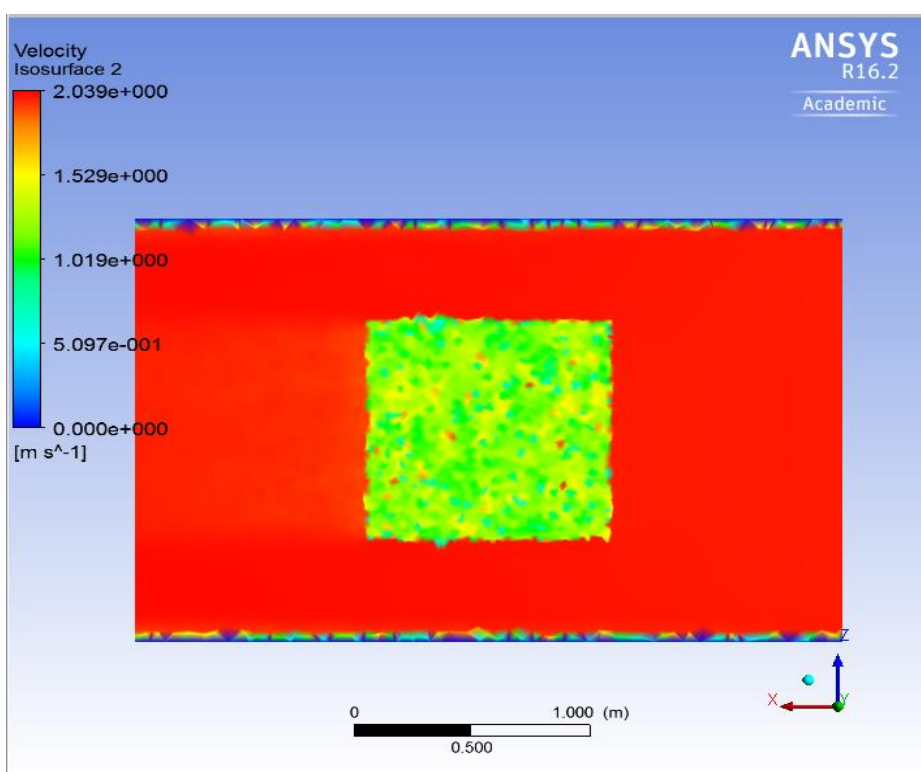
Es pot observar, una capa límit molt continua i estable al voltant de la placa. Està molt enganxada a la paret, però no tant com feia pensar el cas 2D. Sembla que el gruix de la capa sigui més o menys d'1cm o 2cm.

Per això mourem el pla perpendicular a y entre 1cm i 2cm. Apart de poder deduir el gruix de la capa límit i les velocitats que es donen dins de ella, serà interessant veure com es comporta la velocitat en tota la superfície de la placa

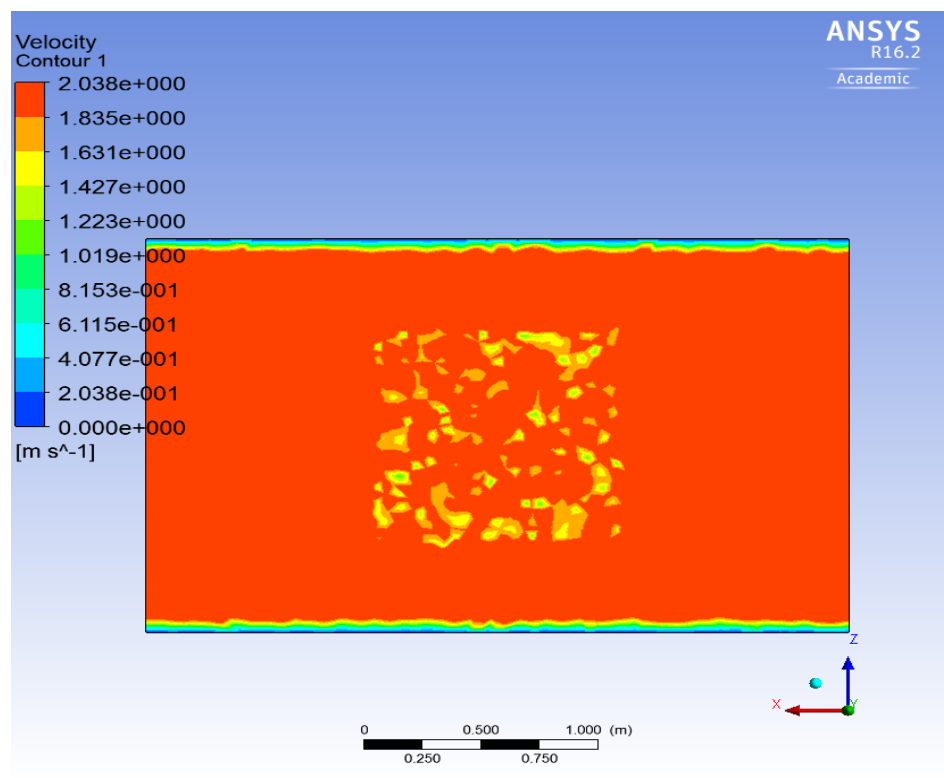
Contorns de Velocitat pla perpendicular a Y (direcció del flux de dreta a esquerra):



Il·lustració 37. Contorns de Velocitat pla perpendicular a Y, en $y = 1\text{ cm}$.



Il·lustració 38. Contorns de Velocitat pla perpendicular a Y, en $y = 2\text{ cm}$.

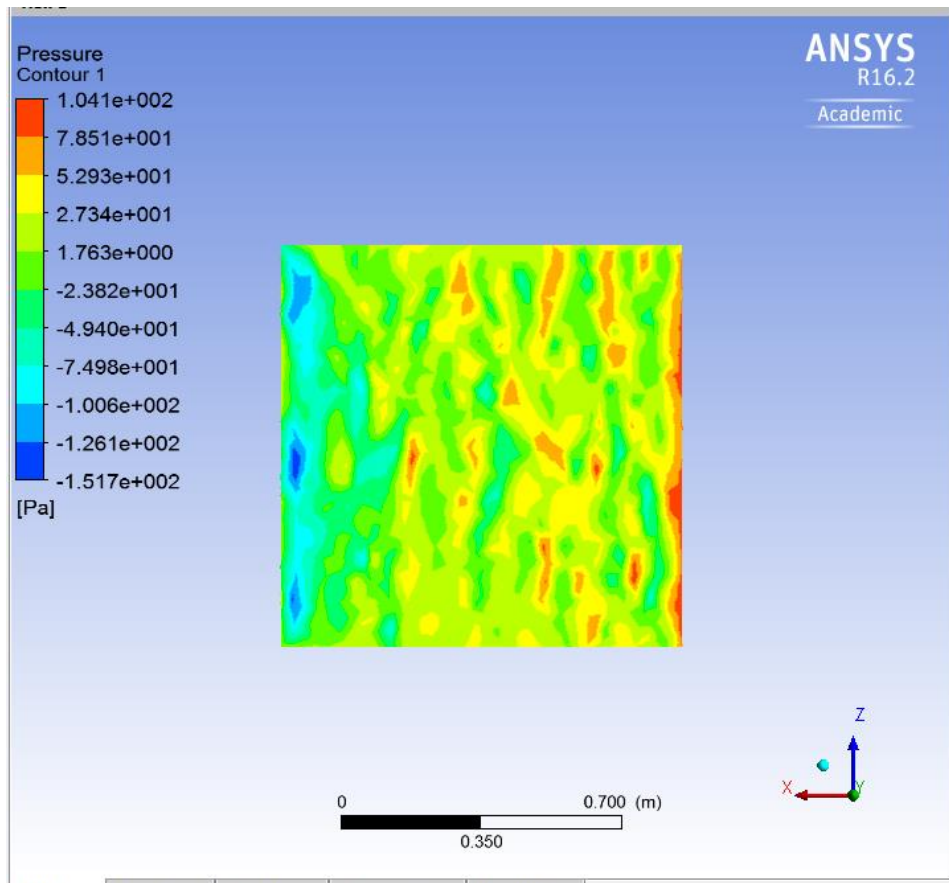


Il·lustració 39. Contorns de Velocitat pla perpendicular a Y, en $y = 3,3\text{cm}$.

En la altura de 1cm, la velocitat sobre la placa és més o menys de 0,5m/s. Mentre que en la de 2cm la velocitat ja arriba a uns 1,3 o 1,4 m/s. A partir de 3,3cm, la velocitat de la placa ja es completament de 2m/s.

També es important observar que en totes les altures la velocitat es molt constant en quasi tota la placa.

Pressions a la paret de la placa (direcció del flux de dreta a esquerra):



Il·lustració 40. Pressions a la paret de la placa.

Es pot observar com hi ha franges de pressions alternades amb franges de depressions. Aquest és l'efecte que donen els riblets sobre una superfície, que ja vam explicar en la part teòrica.

Tot i així es veu com les pressions més fortes són a l'inici de la placa, on el flux impacta inicialment amb la peça, i les depressions més fortes es donen cap al final de la placa, on es crea el deixant de la peça i és més probable que aparegui separació.

7. Anàlisi Econòmic.

Per poder fer un anàlisi complet de tots els costos, haurem de dividir-los en costos fixos i costos variables.

En el primer farem una discretització del projecte, determinant que materials o eines s'han utilitzat i la seva amortització en el temps.

Com a costos variables fem referència a les hores treballades pel personal (en aquest cas jo, com autor del treball). Per determinar les hores treballades farem us del diagrama de Gantt.

7.1. Planificació Temporal del Projecte.

A continuació mostrarem el diagrama de Gantt, on hem separat el treball en diferents parts i tasques realitzades (files), i el temps que li hem dedicat a cada tasca (columnes, cada columna té un valor de dues setmanes).

Cal remarcar que la mitja d'hores treballades serien 11h (8h o menys inicialment, 10 u 12 hores durant la gran part del gruix del treball, 15h les últimes setmanes abans d'entregar). També cal dir, que hi ha tasques que tenen un pes més gran que altres en hores com la Redacció i les simulacions en contraposició als càlculs o la creació de la geometria.

Activitat	17- Feb	3- Març	17- Març	31- Març	14- Abril	28- Abril	12- Maig	26- Maig	12- Juny
Cerca i estudi d'informació									
Redacció memòria									
Càlculs del plantejament teòric									
Creació geometria									
Simulacions									
Resultats i Conclusiones									
Detalls i Organització final de la Redacció									

Taula 3. Diagrama de Gantt.

En base al diagrama i al pes de cada activitat s'ha establert aquesta distribució de hores:

Activitat	Hores
Cerca i estudi d'informació	50
Redacció memòria	120
Càlculs del plantejament teòric	5
Creació geometria	5
Simulacions	90
Resultats i Conclusions	25
Detalls i Organització final de la Redacció	15
Total	310

Taula 4. Hores treballades segons activitat.

Establirem un preu de 12 €/hora, que es bastant acurat per a un enginyer que s'acaba de graduar. Per tant el cost variable seria de 3720 €.

7.2. Discretització de les eines utilitzades.

Els elements que s'han tingut hem compte amb un cost significatiu són el portàtil amb el que se ha fet el treball, i el de les diverses llicències que s'han utilitzat per realitzar les diferents activitats.

Per fer l'amortització determinarem el temps que les hem utilitzat durant el treball, sobre el temps total del seu ús.

La llicència d'Ansys Fluent costa 26000 € [8], s'ha utilitzat 1 mes sobre els 5 anys que es pensa utilitzar, pagant un cost anual de manteniment d'uns 5000 €, uns 51000 euros en total. En el cas de SolidWorks el seu cost és de 6600 € i el seu cost de manteniment es de 1500 € anuals [9], i la duració d'ús seria la mateixa que per l'Ansys Fluent, per tant uns 14100 € en total. Per la llicència del paquet Office per empreses haurem de pagar uns 299 € [10], que es pensa utilitzar durant 10 anys mínim.

La seva utilització durant el projecte ha estat d'1 mes en el cas del SolidWorks, de 2 mesos en el cas de l'Ansys Fluent i de 5 mesos en el cas del paquet d'Office.

	Preu (€)	Percentatge utilització (%)	Total (€)
Llicència SolidWorks	14100	1.67	235
Llicència Ansys Fluent	51000	3.34	1700
Llicència Office	299	4.17	12.46

Taula 5. Costos de les llicències utilitzades.

En el cas del portàtil, s'ha utilitzat un ordinador que es va comprar per 500 €, amb una previsió de durada de 5 anys. Com que el portàtil s'ha utilitzat durant els 5 mesos que ha durat el treball, el seu percentatge d'us ha estat de un 8.34%. Per tant sumarem uns 41.67 € als costos fixos totals.

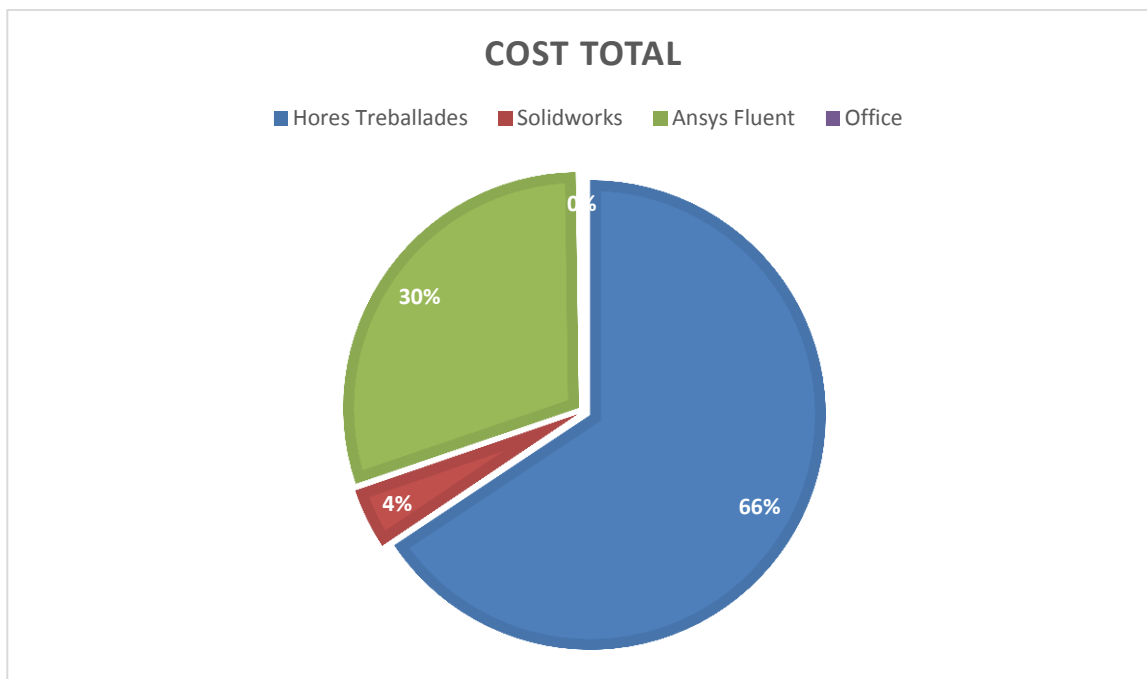
Finalment sumant totes les quantitats dels costos fixos obtenim 1989.13 €

7.3. Costos totals.

	€
Cost Variable	3720
Cost Fixes	1989.13
Cost Total	5709.13
Benefici Industrial (10%)	6280.04
IVA (21%)	7598.85

Taula 6. Costos totals del treball.

El cost que li acabariem cobrant al nostre client seria de 7599 €, arrodonint el preu amb IVA inclòs.



Il·lustració 41. Gràfic dels costs totals sense benefici i sense IVA.

8. Impacte mediambiental.

Pel que fa a l'impacte mediambiental que te aquest projecte en si és bastant reduït. Cal pensar que hem fet servir un portàtil per fer tot el treball. La contaminació que té aquest es la producció d'energia elèctrica que consumeix, i la quantitat de gasos que és capaç d'emetre a l'atmosfera.

Si que és veritat que el transfons d'aquest projecte o d'implantació d'aquest si que tindria un impacte més gran. Ja que si fabriquéssim el banyador hauríem de tenir en compte tota l'emissió de gasos de la fàbrica, la creació de residus de la producció i tot el consum energètic durant el procés. Sense oblidar-nos del teixit del banyador, que depenent del seu material tindria un impacte o un altre.

Però totes aquestes consideracions estan relacionades en el desenvolupament d'aquest treball o en projectes futurs relacionats. Llavors nosaltres només ens centrarem en el portàtil utilitzat.

Pel que fa el consum energètic del portàtil, la part contaminant seria la que ha sigut produïda amb fonts d'energies no renovables. Segons les dades de l'institut català d'energia, en l'any 2018 la font d'energia més utilitzada va ser la nuclear amb un 49,1 %. Aquest percentatge, sumat al 16,6 % d'energia elèctrica obtinguda mitjançant els cicles combinats i el 12,5% produïda per la cogeneració, dona un resultat de l'ús d'un 79,5% d'energies no renovables [11].

Per tant, més o menys, el 79.5% d'energia que consumeix el meu portàtil te un impacte mediambiental. Per tant s'haurien de prendre mesures, com apagar o suspendre la pantalla del portàtil, quan no es necessiti, per tal de reduir el seu consum al màxim.

Després hem de fixar-nos en els gasos contaminants que pot emetre el nostre portàtil a l'atmosfera, com el CO₂. Per una hora de funcionament un ordinador pot emetre entre 52 i 235 grams equivalents del gas contaminant, considerant una potència entre 80 i 360 vats, segons la Comissió Europea. Tot i que també asseguren que un ordinador portàtil, com amb el que ha estat realitzat el projecte, consumeix entre un 50 i un 80 % que el que consumeix un de taula [12].

Tot així la quantitat de gasos emesos es relativament petita. Si durant tots els dies del any es fes un treball intensiu amb el portàtil, els gasos emesos equivaldrien als de un recorregut de 1000km en cotxe.

Conclusions

Tenint en compte els objectius fixats al principi del projecte, és important que de la comparació dels resultats entenguem bé el comportament de la capa límit en cada cas, i quina finalment proporcionaria un major benefici en el nedador.

En els coeficients de forma, podem observar que la placa d'1mm de rugositat té el més petit. Tot i això les diferències entre els altres són petites, i a més tots els coeficients són d'ordre molt baix.

Gràcies a les diferents gràfiques podem determinar el comportament de la capa límit en cada superfície.

Les gràfiques dels vectors de velocitat, contorns de velocitat i línies de corrent, ens permeten observar el gruix de la capa límit en cada cas i el seu creixement. Els contorns de pressió ens ajudaran a determinar les possibles inestabilitats o separacions que pugui haver en les valls dels riblets o darrera de la placa.

Per la placa amb 1mm de rugositat, s'observa una capa límit amb un gruix molt petit, en el que quasi no es pot distingir el seu creixement. En altres paraules, pels efectes dels riblets descrits al apartat 4.7, la capa límit s'enganxa més a la paret i no es desprèn en cap moment.

En el cas de la placa amb 1 cm de rugositat, es determina un gruix bastant més gran que en la de 1 mm. Es veu un creixement clar a l'inici de la placa, fins més o menys un terç, on sembla que s'estabilitza i no creix. Però realment, el que succeeix és que el seu creixement és molt petit, tant que no s'observa, i per tant la capa límit no s'acaba de separar mai.

Per últim en la placa de 2cm de rugositat, s'observa el gruix més gran. També es veu clarament com no deixa de créixer fins el final de la placa, donant a entendre que es produeix un despreniment en la capa límit.

Finalment es conclou que la millor rugositat distribuïda uniformement a la placa és la d'1mm, que és més petita que la capa límit laminar de la placa plana teòrica. Aquesta mida de riblets permet que la capa límit s'enganchi més a la paret de la superfície, reduint la fricció i per tant la força d'arrossegament sobre la placa.

Fent l'estudi 3D (més acurat a la realitat) sobre aquesta placa, ens permet determinar millor les característiques i comportament d'aquesta placa. Gràcies a les gràfiques podem corroborar que la capa límit queda enganxada durant tota la llargada de la placa. A més a més, podem deduir el seu gruix, uns 33 mm des de l'origen. Descomptant el gruix de la

placa plana i la seva rugositat, el gruix de la capa límit és d'uns 30mm més o menys. És més gran del que s'observa a l'estudi 2D, però és més real, ja que la del 2D semblava més petita que la del plantejament teòric.

També cal mencionar, que la capa límit es molt estable i contínua durant tota la placa, lo que vol dir que el seu creixement es tant petit que no afecta o no es pot observar. Per tant no es donen ni transicions ni separacions durant l'evolució de la capa límit sobre la placa.

Com a conclusió final, aquesta serà la superfície que s'hauria d'implementar sobre el banyador d'un nedador professional.

Les recomanacions i suggeriments per treballs futurs són:

- Fer un estudi sobre els possibles teixits tèxtils que afavoririen les condicions i característiques de la superfície escollida.
- Determinar les possibles dimensions del banyador que donarien avantatges al nedador, i les distribucions de les rugositats en aquest. Per poder treure conclusions clares s'haurien de fer proves experimentals amb túnels de vent.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] H. Schlichting and K. Gersten, *Boundary Layer Theory*. Springer: 8th 2000.
- [2] ResearchGate, *Investigation the Effects of Micro-Riblet Film on a Wing-in-Ground Effect*.
https://www.researchgate.net/figure/Arrangement-of-riblets-in-fluid-flow-12_fig1_325659412
- [3] RFEN, *Resultados Nacionales*.
<https://rfen.es/es/section/resultados-competiciones-nat>
- [4] Diario As, *Resultados Juegos Olímpicos*.
https://resultados.as.com/resultados/juegos_olimpicos/resultados/natacion/100_m_libre/s/
- [5] Swimuniversity, *What is The Perfect Swimming Pool Temperature?*.
<https://www.swimuniversity.com/perfect-pool-temperature/>
- [6] Scribd, *Viscosidad cinemàtica*.
<https://es.scribd.com/doc/164721001/1-7-Viscosidad-cinematica>
- [7] CFD Online, *Y+ Wall Distance Estimation*.
<https://www.cfd-online.com/Tools/yplus.php>
- [8] Mscnastrannovice.blogspot, *How much does Ansys cost?*
<http://mscnastrannovice.blogspot.com/2013/04/how-much-does-ansys-cost.html>
- [9] SolidBi, *Precio Solidworks*
<https://solid-bi.es/precio-solidworks/>

- [10] Genbeta, *Microsoft revela el precio de las licencias de Office 2019: entre 149 y 579 euros.*

<https://www.genbeta.com/ofimatica/microsoft-revela-precio-licencias-office-2019-149-579-euros>

- [11] Instituto Catalán de Energía, *Balance de energía eléctrica de Cataluña.*

http://icaen.gencat.cat/es/energia/estadistiques/resultats/anuals/balanc_energia/

- [12] Ecoembes, *Los ordenadores también emiten CO2.*

<https://www.ecoembes.com/es/planeta-recicla/blog/los-ordenadores-tambien-emiten-co2>

- [13] European Scientific Journal, *A REVIEW OF DRAG REDUCTION BY RIBBLETS AND MICRO-TEXTURES IN THE TURBULENT BOUNDARY LAYERS.* November 2013 edition vol.9

- [14] Webserver, *Introducción a la capa límite laminar bidimensional y estacionaria.*

http://webserver.dmt.upm.es/zope/DMT/docencia/mecanica-de-fluidos-ii/material/Capa_Limite_Laminar_Introduccion.pdf

Bibliografia complementària

Frank M. White, *Mecánica de Fluidos*. Mc Graw Hil: 6 2008.

JOSEPH C. MOLLENDORF, *Effect of Swim Suit Design on Passive Drag*, American College of Sports Medicine

Heidarian, *Numerical Analysis of the Effects of Riblets on Drag Reduction of a Flat Plate*, Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 11, No. 3

Javier Jiménez, *TURBULENT FLOWS OVER ROUGH WALLS*, Annu. Rev. Fluid Mech. 2004.

